

REPUBLIQUE ALGERIENNE BEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPERTEMENT DE LA MECANIQUE



**Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique Spécialité :
ENERGITIQUE**

THEME PROPOSE :

**ETUDE SUR LE SYSTEME MULTI EFFETS DISTILATION AVEC
UN CONDENSEUR HYBRIDE**

Réalisé par :

- **AMMALI Sofiane Redah**
- **DILMI Abderrahim**

Proposé par :

Dr.HADJI Ahmed

Année universitaire 2023/2024

REPUBLIQUE ALGERIENNE BEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPERTEMENT DE LA MECANIQUE



Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique
Spécialité : ENERGITIQUE
THEME :

ETUDE SUR LE SYSTEME MULTI EFFETS DISTILATION AVEC UN
CONDENSEUR GEOTHERMIQUE

Réalisé par :

- **AMMALI Sofiane Redah**
- **DILMI Abderrahim**

Proposé par :

Dr.HADJI Ahmed

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier « dieu » le tout puissant pour

Nous avoir donné le courage, la santé, et pour nous avoir permis de réaliser ce modeste travail

**Nous tenons à remercier chaleureusement notre promoteur : Docteur HADJI AHMED
D'avoir accepté de diriger ce travail et de nous avoir prodigué des conseils scientifiques,
ont été précieux et des orientations pour la réalisation de ce travail.**

Des remerciements aux membres du jury, d'avoir accepté de juger ce travail.

**A l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation ainsi que tout le personnel
administratif qui, a participé au bon déroulement de ce travail,**

**Nos remerciements vont aussi à nos précieux parents, nos familles, nos amis et nos
collègues de la promotion 2024.**

A tous ceux qui, par leur encouragement ou leur amitié.

أصبحت معالجة المياه قليلة الملوحة في جنوب الجزائر أمرا لا مفر منه بشكل متزايد، نظرا لتدهور هذا المورد المائي الفريد. الهدف من هذه الدراسة هو توفير حل مستدام مع الحد الأدنى من التأثير على النظام البيئي، أجريت الدراسة لمنطقة أدرار وهي منطقة صحراوية. تمت دراسة سلوك نظام تحلية المياه متهدد التأثيرات مع تعديله ليكون له أقل تأثير على طبقة المياه الجوفية. هذا التعديل جعل من الممكن الحصول على نتائج مثيرة للاهتمام للغاية حيث وصل معدل التحويل إلى 96% وبالتالي الرفض بنسبة 4% خلال العملية برمتها. ومن أجل تقليل التأثير البيئي، تم دراسة اقتران نظام MED المعدل.

Résumer :

Le traitement des eaux saumâtres dans le sud algérien est de plus en plus inévitable, vu la détérioration de cette ressource d'eau unique. L'objectif de cette étude est d'apporter une solution durable avec le minimum d'impact sur l'écosystème. L'étude est réalisée pour la région d'Adrar, une région désertique.

Le comportement d'un système de dessalement multi-effet MED a été étudié tout en le modifiant afin d'avoir un impact minimum sur l'aquifère. Cette modification a permis l'obtention de résultats très intéressants où le taux de conversion a atteint 96%, et par conséquent un rejet de 4% sur tout le processus. Afin de minimiser l'impact environnemental, l'étude du couplage du système MED modifié.

Abstract

The treatment of brackish water in southern Algeria is increasingly inevitable, given the deterioration of this unique water resource. The objective of this study is to provide a sustainable solution with the minimum impact on the ecosystem. The study is carried out for the Adrar region, a desert region.

The behavior of a MED multi-effect desalination system was studied while modifying it in order to have a minimum impact on the aquifer. This modification made it possible to obtain very interesting results where the conversion rate reached 96%, and consequently a rejection of 4% over the entire process. In order to minimize the environmental impact, the study of the coupling of the modified MED system.

SOMMAIRE

Résumé.....	01
Liste Des Tableaux.....	05
Liste des figures	06
Introduction Générale.....	09

CHAPITE I : SITUATION DE L'EAU AU MONDE12-20

I.1: Introduction	12
I.2: Besoins en eau.....	13
I.3: Disponibilité de l'eau	15
I.3.1. : Qualité de l'eau	17
I.3.2 : Normes mondiales et algériennes sur la qualité de l'eau	18
I.4 : Relation eau énergie.....	18
I.5 : Situation de l'eau en Algérie	18
I.5.1 : l'eau en Algérie.....	18
I.5.2 : La pluviométrie en Algérie	19
I.5.3 : Les ressources d'eau conventionnelles	19
I.5.4 : Les ressources en eau non conventionnelles	20

Chapitre II: ANALYSE DE LA ZONE D'ETUDE (ADRAR)..... 22-33

II.1. Introduction.....	22
II.2. Situation Géographique Et Caractéristique De La Wilaya D'adrar	23
II.3 Caractéristiques Climatiques De La Région D'adrar.....	25
II.4 Le Système Aquifère De La Région D'adrar.....	25

II.5 Evolution De L'exploitation De La Nappe Albien	27
II.6 Conclusion	33
CHAPITRE III : Dessalement de l'eau salé	36-56
III. 1: Définition du dessalement	36
III.2 : Évolution des capacités de dessalement dans le monde	37
III.2.1 :Évolution des capacités de dessalement en Algérie	39
III.3 : Les systèmes de dessalement.....	42
III.3.1 : Classification des procédés de dessalement	42
III.3.2 : Les procédés de dessalement à énergie électrique.....	43
III.3.2.1 : Osmose inverse (OI)	43
III.3.2.2 : Électrodialyse conventionnelle	45
III.3.2.3 Distillation par compression mécanique de vapeur (MVC)	46
III. 4: Les procédés de dessalement à énergie thermique	46
III.4.1 : M.S.F : (multi effet stage flash).....	47
III.4.2 : Distillation membranaire (DM)	48
III.4.3 : Distillation à multi effets (MED).....	49
III.4.3.1 : Type des système MED.....	50
III. 5: Problématique de l'impact environnemental du dessalement.....	52
III.6: Gestion environnementale de l'élimination de la saumure à l'intérieur des terres ...	54
III.7: L'énergie nécessaire pour le dessalement.....	54
III. 8: Conclusion	56
CHAPITRE IV: la Modélisation mathématique.....	58-75
Introduction.....	58
IV. 1: Description du processus MED.....	59
IV. 2: Les Equations	61

IV.2.1 : Équations des préchauffeurs.....	61
IV.2.2 : Équations des effets.....	62
IV.2.2.1 : Le bilan salin permet d'écrire.....	62
IV.2.2.2 : Le bilan énergétique s'écrit.....	62
IV.2.2.3 : Les équations de transfert de chaleur.....	62
IV.3: Modélisation mathématique.....	63
IV.3.1 : Modélisation mathématique de l'unité MED.....	63
IV.3:2 Équations du Condenseurs.....	65
IV.4: Résultats et discussion du MED modifié.....	67
IV.5 Résultats et discussions.....	67
IV.5.1 Résultats et discussion du MED modifié.....	67
IV.5.1.1 Détermination du nombre d'effets.....	68
IV.5.1.2 Effet de la température maximale de la saumure sur l'unité MED.....	69
IV.6: Conclusion.....	75
IV.7. Resultats et discussions du MED GEOTHERMIQUE.....	76
IV.7.1. Resultats et discussions.....	77
IV.7.1.1 Détermination de la variation de HIN.....	78
IV.7.1.2 Conclusion.....	79
IV.7.1.3 Détermination de la variaton de longueur d'échangeur.....	79
IV.7.1.4 Conclusion.....	80
IV.7.1.5 Détermination de la variation de la surface d'échangeur.....	80
IV.7.1.6 Conclusion.....	80
CONCLUSION FINAL.....	81
Références.....	83

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Évolution mondiale de la population et des prélèvements d'eau des principaux secteurs au cours du XXe siècle	11
Tableau 1.2 : Répartition eau salée/ eau douce sur Terre ; volume recyclé annuellement.....	13
Tableau 3.1 : Installations de dessalement mises en service entre 1971 et 1982.....	46

Liste des figures

Figure 1.1 : Répartition eau salée/eau douce sur Terre.....	12
Figure 1.2 : Répartition eau salée/eau douce sur Terre.....	14
Figure 1.3 : La disponibilité en eau potable par habitant.....	16
Figure 2.1 : Carte de la Wilaya d’Adrar en Algérie.....	20
Figure 2.2 : Représentation topographie de la région d’étude	21
Figure 2.3 : Croissance démographique.....	21
Figure 2.4 : les limites du système aquifère septentrional	23
Figure 2.5 : carte des épaisseurs de la nappe albienne dans la wilaya d’Adrar	24
Figure 2.6 : schéma du phénomène de la décharge et de la recharge du SSAS.....	25
Figure 2.7 : carte des infiltrations directes dans la nappe du SSAS.....	26
Figure 2.8 : photo de chotts et sebkha	27
Figure 2.9 : puit artésien	28
Figure 2.10 évolution des capacités de pompage de la nappe albienne	29
Figure 2.11: photo du système foggara	29
Figure 3.1 distribution des capacités de production des usines de dessalement par procédés dans le monde (a), au états unis(b), au moyen orient (c)	43
Figure 3.2 graphe résumant le nombre d’unités opérationnelles, l’évolution des capacités installées (a), l’évolution des capacités installées par technologies (b)	44
Figure 3.3 : classification des procédés thermiques et non thermiques	49
Figure 3.4 : schéma d’une unité de dessalement Osmose Inverse OI.....	50
Figure 3.5 : schéma d’une unité d’électrodialyse ED.....	51
Figure 3.6: schéma d’une unité de distillation par compression mécanique de la vapeur MV.....	52
Figure 3.7 : schéma d’un multi stage flash MSF	53

Figure 3.8 : Principe de la distillation membranaire	54
Figure 3.9 : schéma d'un Multi Effet Distillation MED	55

Figure 3.10 : Alimentation en avant multi-effet bouillonnant avec des réchauffeurs d'alimentation régénératifs.....	56
Figure 3.11 : Unité de dessalement multi-effets à alimentation parallèle sans pré-réchauffeurs	56
Figure 3.12 : Système de dessalement multi-effets à alimentation inverse utilisant des évaporateurs à tubes horizontaux.....	57
Figure 3.13 : Évaporateur à film tombant horizontal à tubes	57
Figure 3.14 : Évaporateur à film tombant à tubes verticaux.....	57
Figure 3.15 : Système de dessalement multi-effets avec des évaporateurs empilés verticalement.....	58
Figure 4.1 : configuration MED standard	67
Figure 4.2 : schéma du condenseur hybride	72
Figure 4.3: le nombre d'effet dans le système MED standard et le système MED a condenseur hybride	74
Figure 4.4 : variation de la surface totale des échangeurs de chaleur en fonction de la température d'entrée TBT pour les deux système MED standard et hybride	75
Figure 4.5 : variation de la surface d'échange du dernier condenseur pour les deux système MED Standard et MED modifié.....	76
Figure 4.6 : variation du débit de l'eau de refroidissement pour les deux système MED standard et MED hybride	77
Figure 4.7 : variation du débit de la source de chaleur en fonction de la température d'entrée pour les deux système MED standard et hybride	78
Figure 4.8 : variation du GOR en fonction de la température d'entrée pour les deux système MED standard et MED hybride.....	78
Figure 4.9: variation du taux d'eau de refroidissement avec le nombre d'effet pour les deux système MED standard et MED hybride	79
Figure 4.10 : taux de conversion du système MED en fonction de la salinité de l'eau	80

INTRODUCTION GENERALE :

L'eau est indispensable pour la vie mais sa disponibilité n'est pas assurée partout. La pénurie d'eau se pose et se posera dans de nombreux pays et le monde fait face à une crise de l'eau potable majeure annoncée pour les années 2000-2020. Ce problème s'aggrave à mesure que les villes grandissent, que la population augmente et que l'agriculture, l'industrie et les ménages ont besoin d'eau en quantités toujours plus grandes. Cela risque de mettre gravement en péril le ravitaillement en eau douce d'une grande partie de l'humanité et par voie de conséquence d'aggraver les conflits entre pays voisins ayant des ressources communes [1]. La terre est recouverte de 72% d'eau, dont seulement 3% d'eau douce.

Cette eau est inégalement répartie sur la planète : 10 pays se partagent 60% des réserves d'eau douce alors que 29 pays subissent de nombreuses sécheresses. L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,07 % de la ressource totale soit environ 1 million de km³, elle se trouve en quantité limitée, et la répartition de cette eau est très inégale [2] et sa qualité est constamment menacée.

Aujourd'hui, selon l'OMS, une personne sur trois dans le monde n'a pas assez d'eau pour répondre à ses besoins quotidiens. L'homme s'est ingénie à rendre l'inutilisable utilisable en ayant recours à l'eau de mer représentant une richesse quasiment inépuisable, mais uniquement si on peut la dessaler, car elle contient 1000 fois plus de sel que la limite fixée par l'OMS pour pouvoir être consommée, c'est-à-dire une teneur maximale de 500 mg/L.

Face à cette situation, le dessalement des eaux de mer ou des eaux saumâtres constitue ainsi une des réponses possibles pour s'adapter à la pénurie croissante des ressources en eau. Parmi les pays qui souffrent du manque d'eau notre pays l'Algérie.

Ce manque d'eau est lié à la situation géographique de notre pays, mais aussi le gaspillage (estimé à 40%) lié à la vétusté des canalisations et au manque de civisme des gens et l'effet de serre.

C'est donc dans cette optique que les chercheurs de nombreux pays développent des techniques de dessalement de plus en plus performantes, afin de produire une plus grande quantité d'eau potable à un coût plus faible.

L'objectif de ce travail consiste à évaluer les performances du système MED (multi effet distillation) , en faisant l'étude de l'influence de certains paramètres qui nous donne une

indication sur l'efficacité de notre précédé. Le but de cette recherche est de proposer un système de dessalement avec un taux de conversion très élevé, afin d'optimiser les prélèvements et éliminer les rejets, qui sont très compliqués à gérer dans une zone non côtière. Et cela, tout en s'adaptant aux conditions naturelles et sociales de la zone d'étude. Le système de dessalement proposé doit :

- Être flexible en ce qui concerne la concentration en variation de salinité.
- Avoir un taux de récupération plus élevé qui conduit à une empreinte eau minimale.
- Présenter une simplicité et une grande robustesse pour une durabilité une facilité de gestion
- Nécessiter un minimum d'entretien et n'ayant pas besoin de hautes qualifications.

Ce mémoire s'articule sur la valeur irremplaçable de l'eau, ainsi que la situation de l'eau en Algérie, et la nécessité du recours au dessalement en Algérie et dans le monde. On a également abordé la consommation énergétique et l'impact environnemental du dessalement. on présente la zone d'étude et son positionnement géographique, avec une analyse détaillée de ses ressources en eau, de même qu'une description du système aquifère de la nappe albiennne, ainsi que les domaines d'utilisation de l'eau et son impact sur l'aquifère, la végétation, le sol et la santé humaine.

Nous avons opté pour le système MED que nous avons modifié pour répondre conditions que nous avons posées au préalable. Nous avons ensuite réalisé une modélisation du système MED modifié et nous avons comparé les résultats avec un système MED standard.

Pour finir, une synthèse du travail est présentée dans la conclusion générale.

CHAPITRE I
SITUATION DE L'EAU AU MONDE

I.1 INTRODUCTION

Les écosystèmes et l'intégrité de leurs services écologiques sont menacées par la vitesse et l'ampleur de la consommation des substances naturelles, qui sont causées par le développement économique et l'évolution démographique.

Aujourd'hui, on a affirmé qu'il y avait une limite physique à la poursuite de la croissance économique fondée sur l'utilisation exponentielle des ressources.

Parmi ces éléments naturels, l'eau occupe une place prépondérante. Les ressources en eau douce de notre planète n'ont guère changé depuis des millions d'années. La totalité de ces ressources mondiales en eau douce est fournie par le processus naturel de dessalement de l'eau de mer, avec l'énergie solaire fournie. L'ensemble que constituent le soleil, l'océan et l'atmosphère peut donc être considéré comme une immense usine de distillation et un système très vaste de distribution d'eau.

Par ailleurs, du point de vue quantitatif, il est important de prendre en compte deux aspects : d'une part, une répartition inégale de l'eau disponible sur Terre, et d'autre part, un impact probable du changement climatique qui entraîne des modifications significatives des régimes des précipitations, ce qui entraîne un stress hydrique important. L'eau douce sur Terre ne constitue que 2,5 % du total [3,4] et s'élève à 12 500 milliards de mètres cube. Ce volume suffirait s'il était réparti de manière juste, ce qui n'est pas le cas. La disponibilité d'eau potable de qualité en quantité adéquate n'est pas seulement une nécessité pour la survie des êtres humains. Effectivement, la disponibilité d'eau potable a un impact sur la santé, l'accès à l'éducation, le bien-être, l'espérance de vie et le développement social. [5]

I.2 Besoins en eau :

Plusieurs organisations internationales fixent à 20 litres d'eau par jour le seuil minimal pour permettre le bien-être physique et l'hygiène de base de l'être humain. Toutefois, dès qu'on intègre la toilette et la lessive, ce seuil monte à 50 litres par jour [8].

Pour permettre à l'être humain de répondre à ses besoins de base, Falkenmark et Lindh (1976) ont calculé que 25 litres d'eau par jour sont suffisants, [7].

L'eau est en effet nécessaire à :

- La production de biomasse qui consiste à fournir la nourriture les fibres et les combustibles. Pour qu'un être humain puisse survivre, un minimum de 1000 litres d'eau par jour est nécessaire[7], et 2600 litres d'eau par personne par jour pour un régime végétarien équilibré, [9,3]
- La production industrielle qui, quant à elle, nécessite l'utilisation de l'eau a tous les niveaux de son activité. En effet, l'eau sert à refroidir, transporter, laver, intervenir dans la composition de certains produits ainsi que la maintenance du matériel industriel, [4]
- La production de l'énergie du fait de sa grande consommation. En effet, l'eau est nécessaire à la production de l'énergie à partir de centrales nucléaires, de pétrole, de charbon, de gaz naturel et d'hydroélectricité [10,3].
- L'équilibre des écosystèmes qui soutiennent la vie humaine est tributaire de l'eau [11]. En effet un changement du débit dans un cours d'eau a un impact sur la qualité de l'eau ainsi que les espèces habitantes (extinction, ou invasion d'autres espèces) [12,13].
- La démographie et la consommation croissante résultant de l'augmentation des revenus par habitant sont les moteurs ayant un impact important sur l'eau.
- L'agriculture est le plus grand consommateur d'eau douce, environ 70% de l'ensemble des prélèvements d'eau douce sont destinés à l'irrigation pour l'agriculture [14], et jusqu'à 90% dans certaines régions. Tel que montre le tableau :

Tableau.1.1 : Évolution mondiale de la population et des prélèvements d'eau des principaux secteurs au cours du XXe siècle.

	1900	1900	1950	1960	1970	1980	1990	1995	2000	2025	2050
Population (million)			2542	3029	3603	4410	5285	5755	6181	8000	9200
Superficie irriguée (M ha)	47,3	75,9		142	169	198	243	253	264	307	331
Prélèvements agricoles	513	895	1080	1481	1743	2112	2425	2504	2605	3053	3283
Consommation agricole	321	586	722	1005	1186	1445	1691	1753	1834	2143	2309
Ratio consommation prélèvement	63%	65%	67%	68%	68%	68%	70%	70%	70%	70%	70%
Prélèvements Municipaux (ou Domestiques)	21,5	58,9	86,7	118	160	219	305	344	384	522	618
Consommation municipale	4,61	12,5	16,7	20,6	28,5	38,3	45	49,8	52,8	73,6	86,4
Ratio consommation prélèvement	21%	21%	19%	17%	18%	17%	15%	14%	14%	14%	14%
Prélèvements industriels	43,7	127	204	339	547	713	735	752	776	834	875
Consommation industrielle	4,8	11,9	19,1	30,6	51	70,9	78,8	82,6	87,9	104	116
Ratio consommation prélèvement	11%	9%	9%	9%	9%	10%	11%	11%	11%	12%	13%
Evaporation des réservoirs	0,3	7	11,1	30,2	76,1	131	167	188	208	302	362
Prélèvements totaux	579	108	1382	1968	2526	3175	3633	3788	3973	4711	5138
Consommation totale	331	617	768	1086	1341	1686	1982	2074	2182	2623	2873

Valeurs en km an. Sauf indication. Prévisions pour 2025 et 2050 basées sur la poursuite des tendances observées au XX* siècle. D'après Shiklomanov, 1999 et Marsily. 2006

Avec une croissance rapide de la population, les prélèvements d'eau ont triplé au cours des 50 dernières années. Elle atteindra 9,1 milliards en 2050, dont 2,4 milliards de personnes vivant en Afrique subsaharienne [15]. Afin de montrer clairement les taux de consommation et prélèvement par secteurs la figure 1.1 ci-dessous synthétise la répartition des prélèvements et des consommations d'eau par secteur en 2000 :

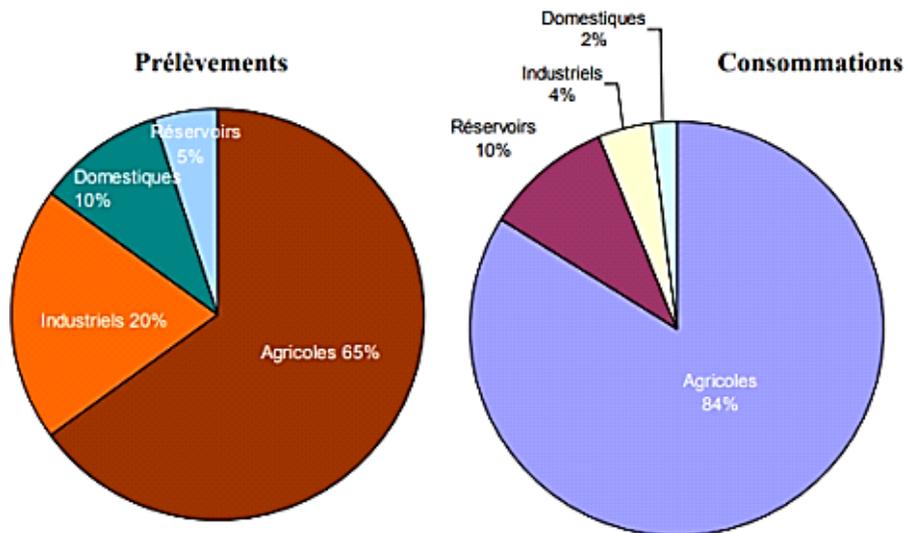


Figure 1.1 : Répartition eau salée/eau douce sur Terre.

I.3: Disponibilité de l'eau

Exploitable par les humains représente une toute petite partie de l'eau disponible dans le cycle hydrologique. D'après les estimations de Shiklomanov et Rodda [16,17], il y a environ 1,4 milliards de km³ d'eau dans l'hydrosphère sous toutes ses formes. Cependant seulement 35 millions de Km³ est de l'eau douce avec un pourcentage de 2,5% de la totalité, alors que le reste (97,5%) c'est de l'eau salée. L'eau douce sur terre se présente en majorité sous forme de glace et neige permanente avec 69,5% et sous forme d'eau souterraine avec 30,1%, le reste se présente sous forme de lacs et rivières 0,27% et d'autres formes (atmosphère, humidité dans le sol, marais, etc.) 0,13%, [16].

Tableau 1.2 : Répartition eau salée/ eau douce sur Terre ; volume recyclé annuellement

Lieu	Volume (10 ³ km ³)	Répartition du volume total de l'hydrosphère (%)	Répartition de l'eau douce (%)	Volume recyclé annuellement (km ³)	Période de renouvellement (années)
Océan	1338000	96,5	-	505000	2500
Eau souterraine (gravité et capillarité)	23400	1,7	-	16700	1400
Eau douce souterraine	10530	0,76	30,1	-	-
Humidité du sol	16,5	0,001	0,05	16500	1
Glaciers et couverture neigeuse permanente	24064	1,74	68,7	-	-
Eau du sol (permafrost)	300	0,022	0,86	30	10000
Eau dans les lacs	176,4	0,013	-	10376	17
Douce	91	0,007	0,26	-	-
Salée	85,4	0,006	-	-	-
Marais, marécages	M.5	0,0008	0,03	2294	5
Eau de rivière	2,1	0,0002	0,006	43000	16 jours
Eau des plantes et animaux	1,1	0,0001	0,003	-	-
Eau dans l'atmosphère	12,9	0,001	0,04	600000	8 jours
Volume Total de l'hydrosphère	1386000	100	-		
Eau douce totale	35029,2	2,53	100		

D'eau douce. D'après UNESCO. 2003 et Shiklomanov et Rodda. 2003 (cité dans UNESCO. 2006)

Les eaux souterraines jouent un rôle majeur dans l'approvisionnement en eau potable de la population mondiale vu que plus de 50% est fournie par cette dernière, idem pour l'irrigation ou 43% de l'eau utilisée provient des nappes d'eau souterraines [15], sans oublier que dans certaines régions les besoins quotidiens fondamentaux en eaux sont satisfaits uniquement par des ressources en eaux souterraines, ce qui est le cas pour 2,5 milliards de personnes dans le

monde. Une telle dépendance a engendré une surexploitation de plus de 20% des aquifères dans le monde induisant de graves conséquences écologiques, [20,15]. Selon les prévisions, en 2030 le monde devra faire face à un déficit hydrique global de 40%, si la situation évolue à un rythme inchangé, sans oublier le changement climatique qui risque d'aggraver encore cette crise, [15]. La Figure 1.2 présente le taux d'eau douce sur terre ainsi que sa répartition

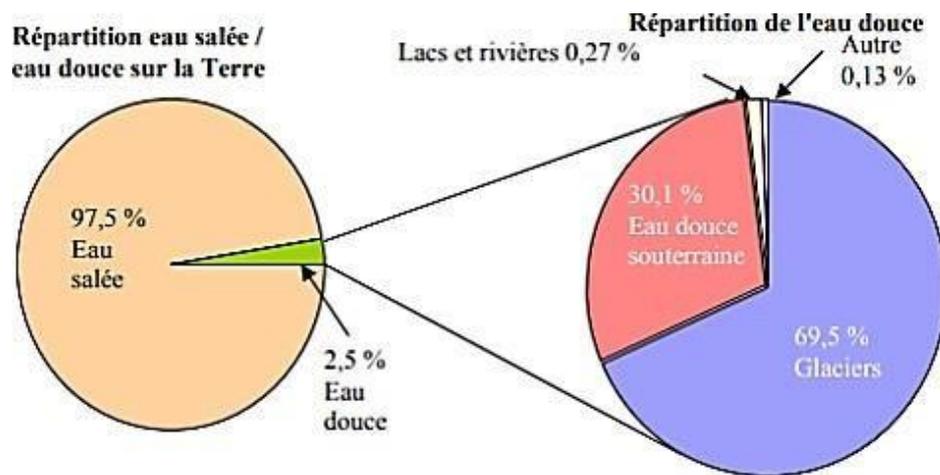


Figure 1.2 : Répartition eau salée/eau douce sur Terre.

Sur les 45000 km³ d'eau douce qui s'écoulent sur terre chaque année, seulement 10 000 à 12 000 km³ sont utilisables. Le reste s'écoule soit dans des lieux inhabités, soit est emportée trop rapidement par les crues et ne peut être stockée. Sachant également qu'une partie doit continuer à s'écouler naturellement pour préserver l'équilibre des écosystèmes. En outre, il existe de grandes quantités d'eau douce qui ne sont pas comptabilisées dans les ressources en eau : ce sont les glaces, les nappes souterraines et les lacs, qui représentent respectivement 24 000 000, 10 000 000, et 90 x 10⁶ de km³, [22,14].

I.3.1 : Qualité de l'eau :

De nombreuses recherches ont étudié la contamination des eaux superficielles et souterraines. Boschet [23] qualifie la contamination de directe ou indirecte :

- Directe et volontaire : elle concerne l'utilisation et le rejet dans la nature des produits phytosanitaires, pesticides et autres dans l'agriculture et l'industrie.
- Indirecte : celle-ci est d'autant plus grave qu'elle affecte même des zones censées être naturelles et protégées. Les éléments contaminants étant dispatchés par ruissellement, par les eaux usées, par le vent, [23,24].

I.3.2: Normes mondiales et algériennes sur la qualité de l'eau :

Des critères d'évaluation de la qualité de l'eau ont été développés notamment par l'OMS et l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, [23,1]. Les études ont permis de constituer des normes de qualité de l'eau à l'échelle mondiale et locale. Le tableau 1.11 (voir Annexe) résume certaines de ces normes algériennes et internationales.

I.4 : RELATION EAU ENERGIE :

L'eau a toujours été associée à la production de l'énergie, centrales nucléaires eau de barrages pour la production de l'électricité etc. Aujourd'hui l'énergie est associée au recyclage de l'eau que ce soit de l'énergie fossile ou électrique ou de l'énergie renouvelable. Il existe une relation étroite entre l'eau et l'énergie, où l'eau est nécessaire pour la production d'énergie en général comme liquide de refroidissement pour les centrales électriques (par exemple au états unis environ 40% de l'eau dans l'industrie est utilisée dans les centrales électriques) donc l'eau est d'une importance majeure pour la production d'énergie d'un côté, de l'autre, l'énergie est indispensable pour les prélèvements, la construction d'infrastructure et la distribution de l'eau pour des fins agricole, industrielles ou domestique. La fraction d'énergie utilisée pour cela varie selon les pays et leurs climats, où elle tourne à environ 5% pour les pays du nord de la méditerranée (climat humide) et de 10% jusqu'à 15% pour les pays du sud de la méditerranée (climat semi-aride a aride).

Cette augmentation est due à la difficulté des prélèvements et au recours à des sources non conventionnelles d'eau comme le traitement des eaux et le dessalement. [21,27].

I.5 : SITUATION DE L'EAU EN ALGERIE :

I.5.1 : l'eau en ALGERIE :

L'Algérie est un pays semi-aride, voire même Aride (200 à 400 mm) et les ressources en eau sont faibles, irrégulières, et localisées dans la bande côtière [28].

D'après le Ministère des ressources en eau, en 2002, le volume d'eau distribué à travers le pays atteignait 3,3 milliards de m³, dont 1300 millions de m³ ont été affecté à l'usage domestique, 1800 millions de m³ pour l'irrigation, et 200 millions de m³ pour l'industrie, [21] La figure 1.3représente la diminution de La disponibilité en eau par habitant depuis 1962, [21,28]

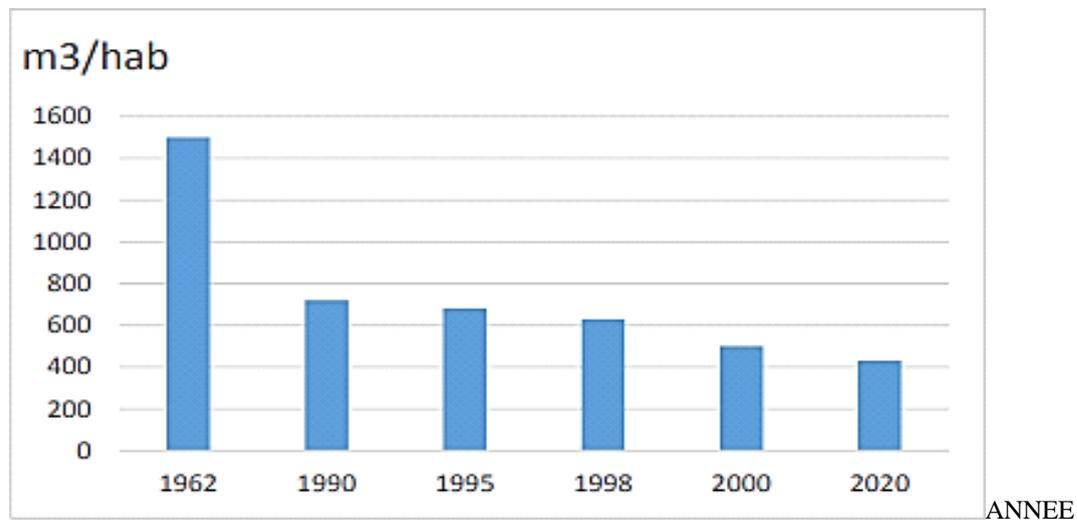


Figure 1.3 : La disponibilité en eau potable par habitant, [28]

L'Algérie est dotée d'un potentiel hydrique d'environ 16.8 milliards de m³ dont 80% de surface et 20% souterraines (sans compter la nappe albienne au sud). Dans le nord du pays, les ressources mobilisées totales sont destinées, à raison de 55,3% à l'irrigation (2,1 milliard de m³), 34,2% à l'AEP (1,3 milliards de m³) et 10,5% à l'industrie (0,4 milliards de m³).

La demande en eau douce croît, chaque année, de 4 à 5%, tandis que les ressources naturelles restent invariables, [21]. L'apport en eau est essentiellement dû aux précipitations et aux nappes fossiles.

I.5.2 : La pluviométrie en Algérie:

Afin de mesurer le niveau de la pluviométrie, l'Algérie compte 220 stations hydrométriques et plus de 800 postes pluviométriques, [29,30]. La distribution de la pluviométrie varie d'une région à l'autre du pays. La région de l'ouest ne reçoit que 25% des écoulements, [21].

I.5.3 : Les ressources d'eau conventionnelles:

Les ressources conventionnelles comprennent les ressources renouvelables et les ressources non renouvelables.

- Les ressources renouvelables sont la totalité des écoulements d'un pays additionné aux éventuels apports provenant des pays voisins. Ces principales ressources sont les eaux de surfaces et les eaux souterraines peu profondes.
- Les ressources non renouvelables sont les nappes phréatiques très profondes. Dans le Sahara, la nappe profonde du continental intercalaire constitue l'un des plus grands aquifères captifs au monde. Les eaux de surface (cours d'eau, lacs, étangs, etc) en Algérie, résultent des précipitations qui sont concentrées au nord du pays avec une moyenne annuelle de 95 à 100x10⁹ m³. Malheureusement plus de 80x10⁹ m³ s'évaporent, 3x10⁹ m³ s'infiltrent dans le sol, et 12.5x10⁹ m³ s'écoulent dans les oueds. Une partie de ces eaux de surface est captée

grâce à 65 de grands barrages, pour pourvoir à l'alimentation de la population en eau. 92% des précipitations sont localisées au nord du pays sur seulement une surface de 300 000 km² soit, 13% de la totalité du pays. La disponibilité des eaux de surface suit la distribution climatique du pays, où elle décroît du nord au sud, d'un climat méditerranéen au nord à un climat aride à hyperaride au sud. Ces ressources de superficie sont renouvelables à 70% seulement et ne représentent que le quart du total des ressources hydriques disponibles. Les ressources en eau superficielles au Sahara sont localisées dans les piedmonts de l'Atlas saharien et dans les régions du Hoggar et du Tassili. Les pluies sont généralement rares et proviennent surtout du grand atlas marocain (Oued Guire) et du versant sud des Aurès, [32] L'Algérie compte aujourd'hui 65 barrages en exploitation d'une capacité de stockage de 7,4 milliards de m³, 14 en cours de réalisation pour une capacité globale à terme de 8,4 milliards de m³. À cela s'ajoute 163 petits barrages et 400 retenues collinaires destinés à des fins agricoles [21,33]. Aussi bien au nord qu'au sud, l'Algérie compte de nombreuses nappes d'eau souterraines. La capacité des nappes au nord est d'environ 2 milliards de m³, en partie renouvelables. Ces nappes sont essentiellement alimentées par les précipitations. Elles sont dans un état de surexploitation, en particulier celles de la Mitidja, [34]. Au sud, les nappes phréatiques de faible profondeur sont pour la plupart saumâtres. Elles existent dans les lits d'oueds. Mais la plus grande réserve d'eau du sud est contenue dans la nappe albiennaise. Leur potentiel est estimé à plus de 60000 milliards de m³ [30]. Pourtant les réserves exploitables sans risques de déséquilibre hydrodynamique sont estimées à 5 milliards/an. Aujourd'hui l'exploitation de ces réserves est estimée à 1.6 milliards de m³ /an [21]

- **I.5.4: Les ressources en eau non conventionnelles :**

On entend par eaux non conventionnelles le dessalement des eaux saumâtres, de l'eau de mer, ainsi que le recyclage des eaux usées et leur utilisation après traitement, [32]. En 1997, sur 50 stations d'épuration existantes, 9 étaient à l'abandon et 35 à réhabiliter, elles traitaient à peine 90 hm³ /an. En 2000, le pays disposait de 68 stations d'épuration dont 12 uniquement étaient opérationnelles. Vu le volume des eaux usées produites chaque année et les capacités de traitement actuelle qui n'atteignent pas les 400 millions de m³, il est constaté que le nombre est très limité, [32]. Quant à l'eau dessalée, bien que très onéreuse, elle ne concerne que l'utilisation domestique vu sa faible capacité.

CHAPITRE II : ANALYSE DE LA ZONE D'ETUDE (ADRAR)

II.1. INTRODUCTION

Le cas d'étude concerne la wilaya d'Adrar. Le développement économique constant de cette région depuis plus de trois décennies, avec une croissance démographique rapide ayant pour corollaire le développement des domaines agricole, touristique et industriel. Ces derniers ont eu un impact sur la consommation de l'eau et son exploitation d'une manière exponentielle. Le type d'exploitation ancestral de la nappe du continental intercalaire basé sur les foggaras et sur une consommation raisonnable et donc durable de la ressource eau, a brutalement basculé vers une exploitation intensive pour répondre aux besoins sans cesse grandissants des différents secteurs domestiques et économiques. La demande croissante aussi bien pour les besoins domestiques qu'agricoles et industriels, implique que le captage de l'eau doit se faire à des profondeurs toujours plus grandes. L'entretien des foggaras est négligé, les périmètres agricoles mis en valeur sont de plus en plus grands : tout cela condamne la pérennité du captage traditionnel des foggaras et de tout le système oasien et des écosystèmes de la région.

Plusieurs études ont prouvé la hausse permanente de la salinité de la nappe résultant de sa sur exploitation qui a déséquilibré sa qualité et la met sérieusement en danger la dégradation continue que connaît la qualité de l'eau de la nappe albienne a amené les autorités du pays à se tourner vers le dessalement de cette dernière.

II.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CARACTERISTIQUES DE LA WILAYA D'ADRAR :

La wilaya d'Adrar est située au sud-ouest de l'Algérie en plein cœur du Sahara, séparée de plus de 1200 km de la capital Alger. Elle est géolocalisée entre les méridiens : 2° E et 6° W, et les parallèles 20° et 32° Nord, comme la plupart des Wilaya du sud Algérien elle s'étend sur une très grande superficie de 427 368 km², soit environ 18 % de la superficie du pays [34]. Comme présenté dans la figure 2.1 la Wilaya est limitée par :

- Au nord les Wilayas de El Bayed et Ghardaïa
- A l'est la Wilaya de Tamanrasset
- A l'ouest les Wilayas de Bechar et Tindouf, ainsi que les frontières avec la Mauritanie
- Au sud les frontières maliennes (les frontières avec le mali)

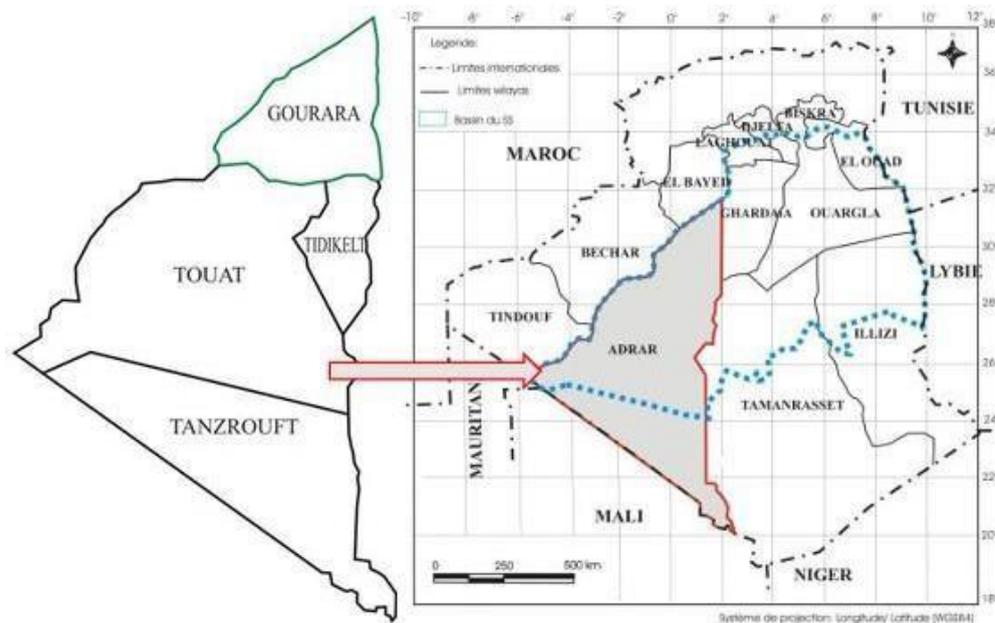


Figure 2.1 : Carte de la Wilaya d'Adrar en Algérie

On observe dans cette région quatre aspects géographiques du terrain (morphologies), le plateau, l'ERG (plaine), le REG, et la dépression (Sebkha). Représentés en 3D dans la figure 2.2[34] suivante

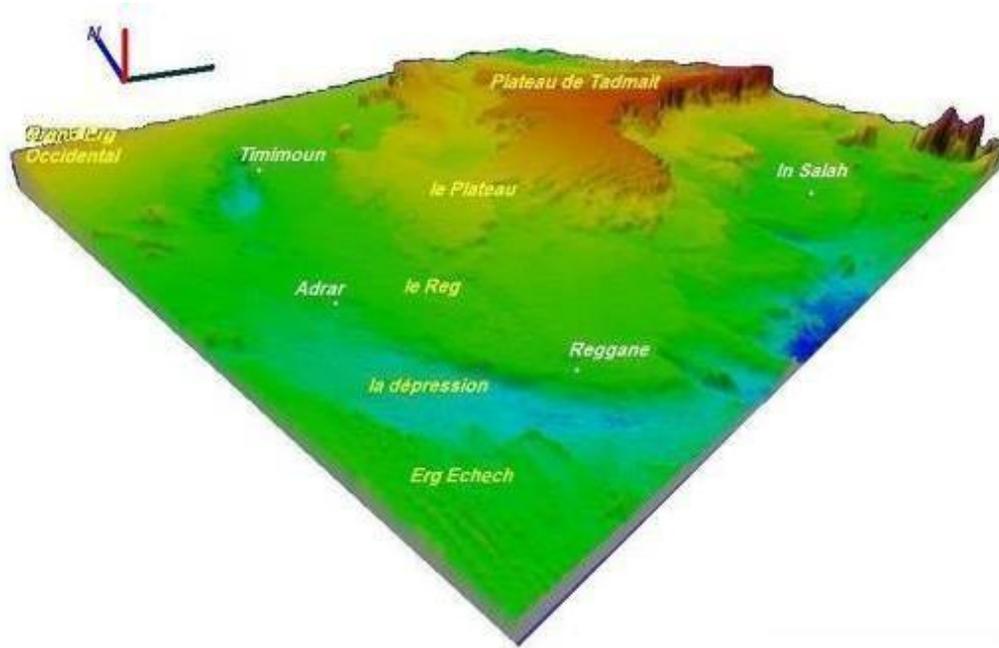


Figure 2.2 : Représentation topographique de la région d'étude

L'estimation de la population réalisée en 2013 et de l'ordre de 455 828 Habitants (Peu peuplé regardant sa superficie avec une densité d'environ 1,06 habitant/km).

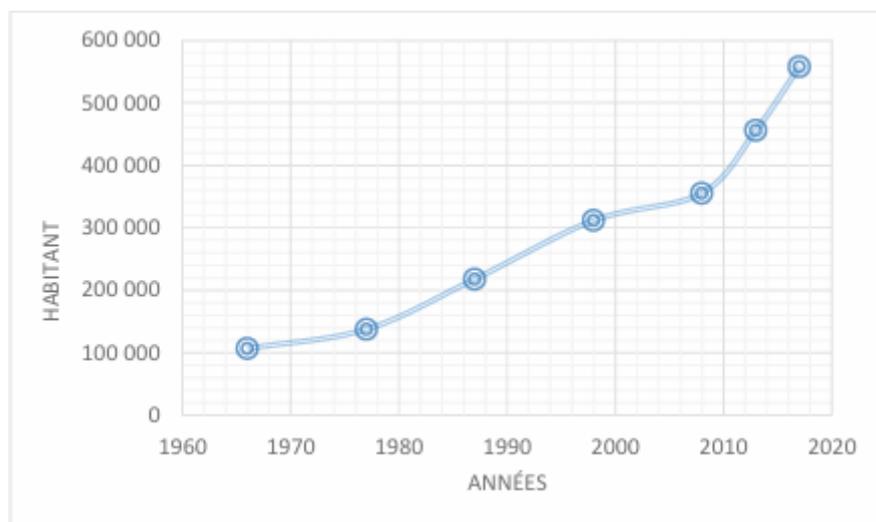


Figure 2.3 : Croissance démographique

On constate sur la figure 2.3 une croissance relativement faible de 1960 à 1980. Le nombre de la population a pratiquement doublé de 1980 à 1990. A partir de l'an 2000, la croissance démographique devient exponentielle.

II.3 CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DE LA REGION D'ADRAR

La Wilaya d'Adrar située au milieu du désert Algérien, se caractérise par un climat sec et hyper aride d'après l'indice d'aridité de DE MARTONE (avec un $I < 5$) ainsi que le Climagramme d'Emberger. La température moyenne est de 26°C avec un minimum de $4,5^{\circ}\text{C}$ en hiver et un maximum de 46°C en été. Ces températures élevées durant toute l'année favorisent le phénomène de l'évaporation qui peut atteindre 5000 mm/an , avec des valeurs mensuelles supérieures à 200 mm , et un maximum d'évaporation de 724 mm au mois de juillet et d'août.

En outre, la région est caractérisée par des précipitations très faibles (indice DE MARTONE Climagramme d'Emberger), avec des moyennes mensuelles qui ne dépassent pas les 5 mm [34].

D'après les caractéristiques citées précédemment aucune sorte de vie ne peut exister dans ces conditions, sauf que dans cet immense désert une source d'eau inestimable existe sous la terre, un système aquifère d'une vaste étendue (transfrontalier).

II.4 LE SYSTEME AQUIFERE DE LA REGION D'ADRAR

Le nord de la Wilaya d'Adrar dispose d'un aquifère gigantesque qui est le continental intercalaire (CI) ou encore nommé la nappe Albienne qui appartient à son tour à l'un des plus grands systèmes d'eau souterraines au monde connu sous le nom du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS).

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS), considéré comme le deuxième plus grand réservoir d'eau souterraine dans l'Afrique du nord, avec une réserve d'eau estimée à $60\,000$ Milliard de m^3 sur une superficie d'environ 1 million de km^2 , comme la plupart des aquifères du continent africain le SASS est un aquifère transfrontalier partagé entre trois pays, l'Algérie, la Tunisie et la Libye [35,36].

La répartition de cette ressource d'eau n'est pas la même dans les trois pays, l'Algérie détient la plus grande portion avec une superficie de $700\,000\text{ km}^2$ qui est l'équivalent de 60% de la

superficie totale du SASS, le reste est partagé par la Libye et la Tunisie comme suit 220 000 km² (30%), et 80 000 km² (10%) respectivement [35].

Ce bassin (SASS) renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI). La formation aquifère la plus étendue du système aquifère c'est bien le continental intercalaire (CI), en conséquent ses limites sont considérées comme les limites de tous le SASS, [136] : (fig 2.4)



Figure 2.4 : les limites du système aquifère septentrional [35]

L'épaisseur de la nappe du Continental Intercalaire diminue d'Est vers l'Ouest et du Nord vers le Sud, il est de l'ordre de 700 m sous le recouvrement du plateau de Tademaït, alors qu'il est de moins de 40 m vers l'Erg Echech l'épaisseur du Continental Intercalaire dans la zone d'étude est peu épais. Allant d'Adrar à Reggane l'épaisseur du CI ne dépasse pas les 250 m [34].

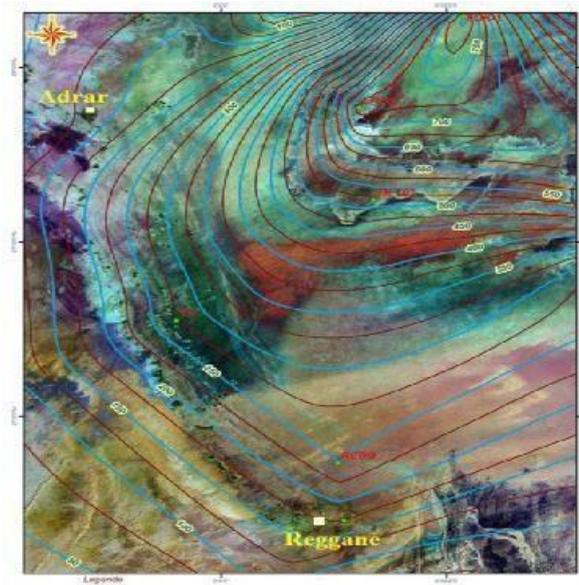


Figure 2.5 : carte des épaisseurs de la nappe albiennienne dans la wilaya d'Adrar [34]

Plusieurs études hydrogéologiques et hydro-chimiques ont été réalisées sur le système aquifère du Sahara septentrional, afin de définir ses limites géographiques, les directions des flux d'eau entre les nappes, l'évolution du niveau piézométrique, l'estimation de sa charge et décharge, ainsi que la connaissance des faciès chimiques de l'eau et l'évolution de sa composition chimique.

II.5 EVOLUTION DE L'EXPLOITATION DE LA NAPPE ALBIEN

Selon plusieurs estimations la décharge de l'aquifère a dépassé le taux de recharge au début des années 80, [35]

Le schéma suivant présente le phénomène recharge/décharge du SASS.

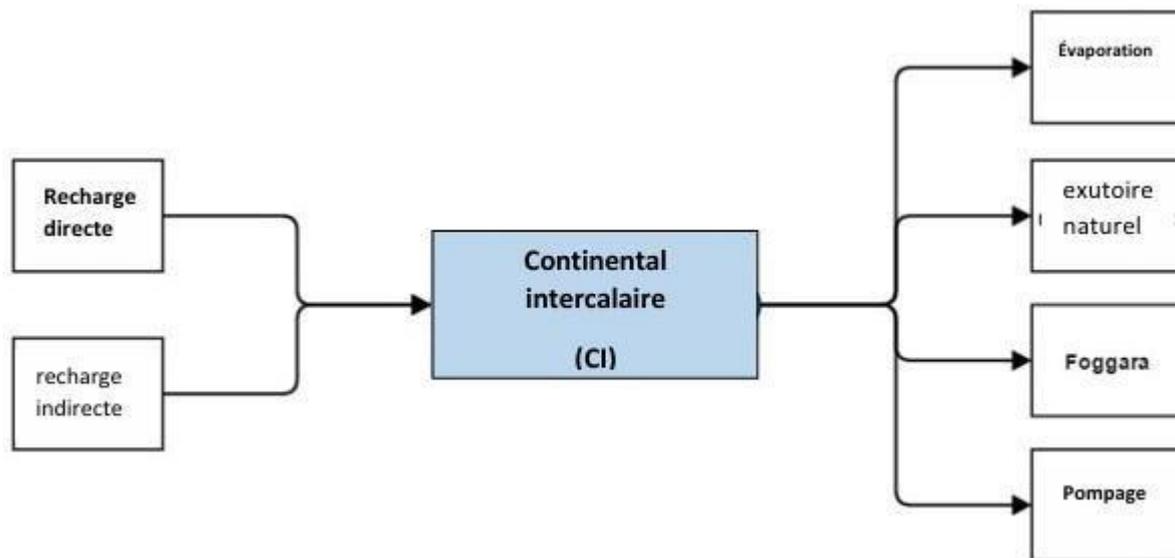


Figure 2.6 : schéma du phénomène de la recharge et de la recharge du SSAS

On distingue deux modes de recharge direct et indirect. En général la recharge directe est importante dans les zones humides puisqu'elle se traduit par l'infiltration directe des eaux de pluie ce qui n'est pas le cas dans notre région hyper aride. D'où la rareté de ce mode de recharge. Toutefois, la recharge indirecte est plus importante comparée au premier mode, mais reste faible comparée à la taille du système aquifère et le développement de son exploitation, et elle se traduit par ruissellement à travers les joints ou fissures, l'écoulement dans les étangs et les "pertes de transmission" pendant le ruissellement dans une rivière et les inondations [35]. Plusieurs méthodes de calcul utilisées ont permis d'avancer divers chiffres concernant l'estimation de la recharge des aquifères du Sahara septentrional. Mais vue la gigantesque superficie de l'aquifère l'estimation de la recharge n'est pas facile et d'après l'OSS (Observatoire du Sahara Septentrional) la connaissance de l'alimentation du CI et du CT n'a jamais pu bénéficier d'investigations spécifiques et cette question est toujours demeurée sans réponse véritable [35]. La recharge du SASS par infiltration directe des précipitations s'effectue sur l'ensemble des zones d'affleurements perméables ou dite utiles, qui se situent sur les régions où la nappe est libre. Enfin l'ensemble des estimations de recharge du SASS publiées à ce jour tournent autour de 1 Milliard m³/an (répartis à 2/3 pour le CT et 1/3 pour le CI). Puisque notre zone d'étude se positionne dans la nappe Albienne on va citer les zones de recharge de cette dernière ainsi que quelques estimations de sa recharge.

Les zones d'affleurements utiles du continental intercalaire (CI), se situent en général sur les limites de la nappe adjacente à un relief montagneux (Atlas saharien), et plateau (Tademaït, etc...), ou de manière indirecte sur les zones de dunes sableuses ERG (grand erg occidental), la figure 2.7 représente ces zones. La wilaya d'Adrar se situe sur la zone Sud-Ouest de la nappe Albienne ou la recharge s'effectue directement des rebords Ouest du plateau de Tademaït et au Sud du plateau du Tinrhert, et indirectement sur le grand erg occidental [35].

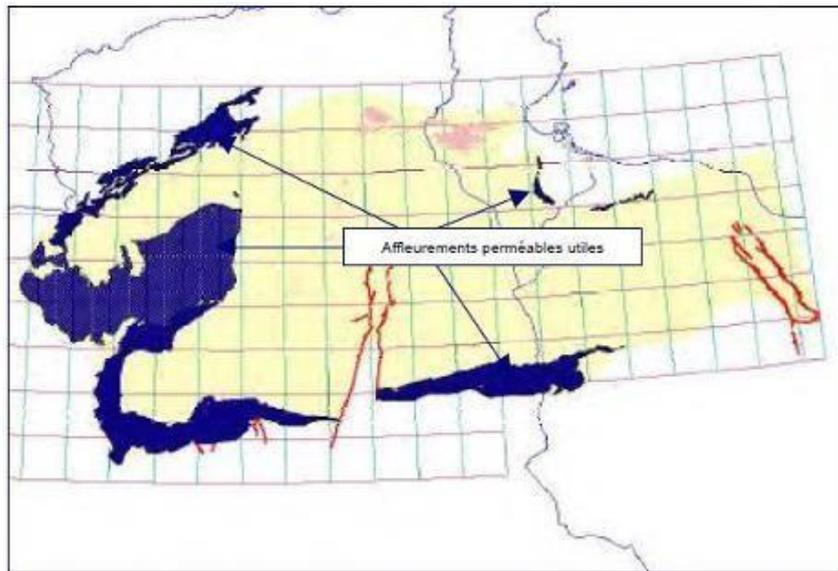


Figure 2.7 : carte des infiltrations directes dans la nappe du SSAS [135]

Concernant la décharge, on distingue deux types d'épuisement naturel qui ne peuvent pas être exprimés comme exploitation qui sont l'évaporation et les exutoires naturelles. En plus de ces décharges naturelles, deux types d'exploitation humaine de cette ressource sont signalés, le système traditionnel qu'est les Foggaras définie aussi comme exutoires naturelles artificielles, et le système conventionnel qu'est le pompage de l'eau à partir de forages par le biais de pompes.

A. L'évaporation en zone aride la quantité d'eau évaporée est nettement supérieure à la quantité d'eau fournie par les précipitations, et peut atteindre de 10 à 20 fois cette valeur [133], dans le Sahara algérien théoriquement une nappe d'eau découverte, alimentée en permanence, peut subir une évaporation annuelle moyenne allons de 3 à 5 m, selon les localités [35].

D'après le rapport de synthèse du Project SASS, La région d'étude (Wilaya d'Adrar), le touât, le Gourara, et le Tidikelt qui sont des zones d'affleurements où la nappe n'est pas profonde et

libre, peut subir des pertes significatives par évaporation. Le flux d'évaporation calculé par des formules empiriques indiquerait un débit continu de l'ordre de 10 m³/s, une telle valeur calculée pour juste une partie de la nappe laisse à réfléchir, toutefois des investigations plus approfondies ainsi que des modélisations plus fines doivent être réalisées afin de donner des estimations plus précises de ce phénomène [35].

B. Les exutoires naturels du SASS

Les exutoires naturels d'un système aquifère sont des points ou des zones qui se situent à un niveau piézométrique plus bas que celui d'une nappe libre, ce qui va se traduire par des zones dites humides permanentes (chotts, puits artésiens, ou sources), ou saisonniers (oueds saisonniers, ou sebkha).

C. Les sebkhas

Elles sont des dépressions peu profondes renfermant de l'eau salée, elles se tarissent pendant les fortes canicules. Les sebkhas servent d'exutoires drainant les eaux d'une partie de la nappe phréatique et les crues des oueds [35]. Fig. 2.8

D. Les chotts

Ce sont des dépressions localisées dans les bas-fonds des bassins endoréiques, caractérisés par une profondeur qui ne dépasse pas quelques mètres lors de la période hivernale et qui diminue fortement en période estivale, ainsi qu'une superficie allant jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'hectares figure 2.8.



Figure 2.8 : photo de chotts et sebkha

Situés à des altitudes inférieures au niveau de la mer. L'eau y est salée et provient du drainage des eaux d'irrigation des palmeraies ainsi que des aquifères dont les eaux peuvent remonter à la surface par endroits. B. Les puits artésiens Un puits artésien est une exsurgence formant un puit où l'eau jaillit spontanément. L'« artésianisme » se produit lorsque la configuration particulière de la géologie d'un lieu et sa topographie provoquent une telle mise en pression de l'aquifère que la ligne piézométrique « sort » du sol comme présenté dans la figure 2.9 suivante.

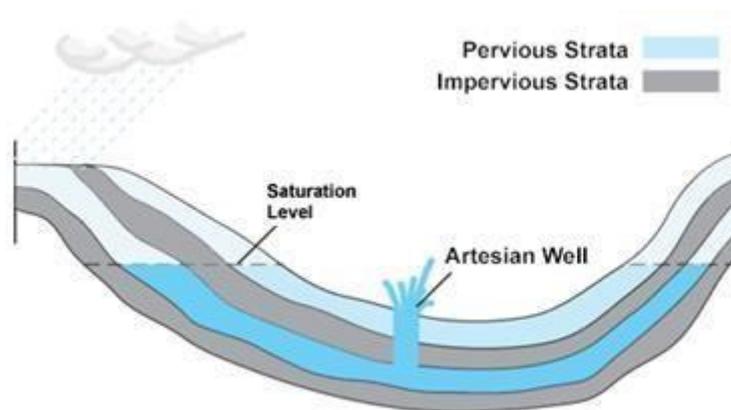


Figure 2.9 : puits artésien

C. La décharge par exploitation humaine Les forages conventionnels Un nouveau système d'exploitation par la création de forages et l'utilisation d'un système de pompage pour puiser de l'eau est apparue dans les années 50. Le nombre de forages captant les deux principales nappes du bassin saharien était relativement faible avant cette période et la plupart de ces forages étaient localisés dans le Sahara algérien et accessoirement en Tunisie. Au début des années 70, ce nombre était de près de 1646 forages dont la plupart captent la nappe du Complexe terminal (1398 forages). Depuis le milieu des années 70, le nombre des nouveaux forages n'a cessé de croître pour atteindre en l'an 2000, plus de 8000 points d'eau [35], la figure 2.10 résume l'évolution des débits de pompage à partir de la nappe albienne dans le temps.

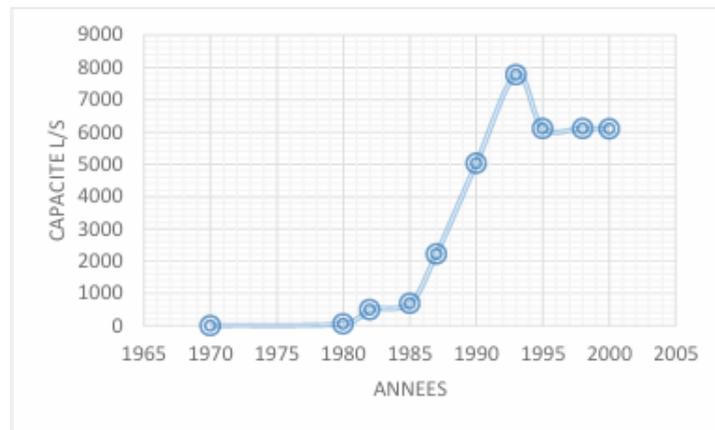


Figure 2.10 évolution des capacités de pompage de la nappe albiense

Les Foggaras Les foggaras sont un système de drainage d'eau par des conduites souterraines et des puits. D'après GOBLOT (PNUD, 1986) l'origine de ce type de captages d'eau nous viens d'Iran, où le nom des foggaras est Qanât, et il existe depuis plus de 3000 ans. Puis il s'est propagé dans environ 30 pays. Quant aux Foggaras algériennes d'après (Hassani, 1988) elles auraient été introduites au XIe et XIIe siècle par El Malik El Mansour, qui aurait creusé la première foggara à Tamantit (à 15 km d'Adrar) Ensuite, les foggaras ont été développées dans le Touat et le Gourara par des tribus arabo-berbères [137]. Ce système de conduites souterraines entre des puits verticaux conduit l'eau de l'intérieur d'une colline aux villages de la vallée. Cette technique est utilisée depuis des siècles. Elle utilise la force de gravité pour son fonctionnement, et pas d'énergie. L'eau est prélevée à la surface de l'albiense et produit un faible débit voir figure 2.11.

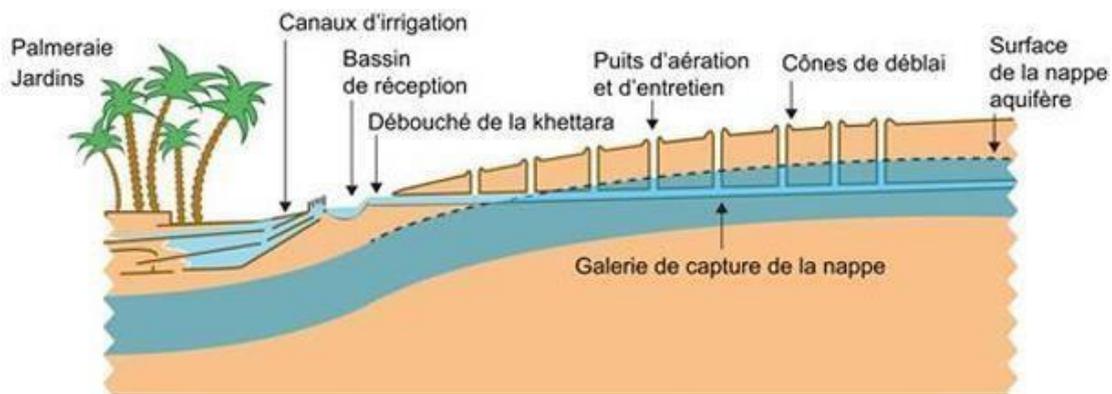


Figure 2.11: photo du système foggara

Cependant, contrairement aux forages conventionnels l'évolution des capacités de prélèvement des foggaras a connu une diminution considérable durant les dernières années, comme conséquence à la baisse du niveau de la nappe à cause du pompage, (Voir figure 2.12).

II.6 CONCLUSION :

La région d'étude est dotée d'un gigantesque potentiel hydrique souterrain. Malgré l'abondance de ce gisement, il faut pratiquer une gestion raisonnable afin de le préserver car c'est une ressource finie et c'est la seule source d'eau dans la région. D'après l'analyse des données des puits nous avons constaté que cette eau a une salinité élevée et que ce degré de salinité augmente chaque année du fait de l'exploitation humaine. La majorité des minéraux dépasse le seuil fixé par l'OMS. Ces caractéristiques de la salinité de l'eau ont un impact négatif sur la santé humaine, la production agricole ainsi que les sols agricoles irrigués. Pour l'utilisation de cette eau d'une manière optimale et sans impact négatif, un traitement de cette dernière s'impose.

Chapitre III : Dessalement de l'eau

INTRODUCTION :

Le troisième chapitre présente la solution proposée pour répondre à la problématique de cette recherche pour l'utilisation de cette eau d'une manière optimale, Le dessalement de l'eau est souvent conçu comme la solution magique de ces problèmes sauf bien entendu pour les pays sans accès à la mer. Puisque 97% de l'eau sur terre est de l'eau salée, le dessalement peut apparaître comme une solution raisonnable au moment où les défis liés à la qualité de l'eau, à sa rareté et à la qualité des infrastructures deviennent plus pressants tout autour de la planète.

III.1 : Définition du dessalement :

Le dessalement de l'eau est un phénomène ou une technique qui existe depuis la création de la terre elle-même, sous une forme cyclique. Toutefois, depuis fort longtemps, l'homme a connu et utilisé ce phénomène. Aristote (384-322 av JC) cite dans son livre « météorologie », la séparation des sels sans changement de phase par la mise en place d'un récipient en terre fermé dans l'eau de mer. L'eau qui rentre dans ce récipient en terre est de l'eau douce. Durant l'âge d'or de l'Islam, les sciences ont connu un développement considérable, notamment dans le domaine du dessalement. Au 7ème siècle par Jabir Ibn Hayane a établi les premières règles pour la distillation pour la première fois, [38].

Vers la fin du 9ème siècle Ibn Mansour Moaffak Ibn Ali Adaoui a publié le premier travail scientifique sur le dessalement. Pendant la Renaissance (1533-1615), Della Porta décrit une sorte d'alambic solaire utilisé pour le dessalement des eaux saumâtres dans sa monographie *Magiae Naturalis*. Il a également écrit, sur la façon d'obtenir de l'eau douce de l'air, qui est l'embryon de méthode d'humidification et de déshumidification. Après ces travaux, les premières expérimentations signalées pour le dessalement datent de 1627 (Sir Francis Bacon, sable de filtration), et 1791 (Thomas Jefferon, dans la distillation), [39].

Quant à la première construction d'une station rudimentaire, il semble qu'elle ait été réalisée sur la plage de Tunis en 1650. En 1862, Lavoisier focalise la lumière du soleil dans un flacon en utilisant de grandes lentilles installées sur un support pour faire de la distillation solaire [37, 38]. En 1869, Mouchotte décrit l'ensemble du processus de l'énergie solaire distillation effectuée par un réflecteur en verre argenté [39,41].

En 1870, l'ingénieur suédois Carlos Wilson a conçu et construit la première usine de dessalement d'eau saumâtre solaire à grande échelle au monde dans le nord du Chili région Las Salinas en 1872.

Parmi les premières tentatives de grands projets industriels de dessalement, nous pouvons citer également celui de Tignes, Maltes 1881. La première distillerie d'eau de mer de l'île est érigée à Sliema afin d'alimenter en eau la caserne de Tigné. En 1882, la distillerie a été réhabilitée depuis lors en imprimerie. On peut citer aussi, qu'en 1907, la mise en place de l'usine de dessalement de Djeddah, Arabie Saoudite, et qu'en 1952, les Etats Unis lancent le programme de dessalement industriel par le biais de la loi de l'eau salée.

Le processus de dessalement a connu un développement important dans le 20ème siècle suite à l'évolution de la machine à vapeur, ainsi qu'aux exploits scientifiques réalisés durant la deuxième guerre mondiale. Au début des années 50, de nouveaux procédés sont apparus ; ce sont des méthodes qui ne nécessitent pas un changement de phase de l'eau pour la dessaler. Elles utilisent plutôt une séparation dans la même phase par l'intermédiaire d'une paroi semipermeable qu'on appelle membrane sélective.

III.2 :Évolution des capacités de dessalement dans le monde :

Les premiers pays à utiliser le dessalement à grande échelle pour la production d'eau potable municipale sont localisés au moyen orient, et la première usine de dessalement industrielle à procédé de distillation est ouverte en 1960 au Kuwait. Depuis la fin des années 60 et 70, le développement des techniques de distillations et des techniques membranaires, a permis une augmentation exponentielle dans la capacité mondiale du dessalement due au progrès technologique des années 70. L'Arabie Saoudite est le plus grand leader dans ce domaine avec un pourcentage de 26% de la capacité globale produite dans le monde, suivie par les États-Unis au deuxième rang avec 17% de la capacité mondiale produite, [43, 44]

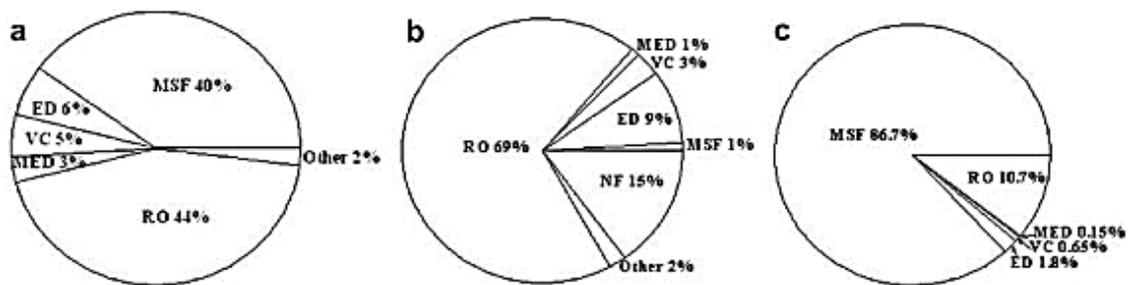


Figure 3.1 distribution des capacités de production des usines de dessalement par procédés dans le monde (a), aux États-Unis(b), au Moyen-Orient (c), [45].

Six des onze pays qui possèdent la plus grande capacité produite d'eau salée, sont localisés au Moyen-Orient. L'Espagne utilise le dessalement depuis 1964 pour l'approvisionnement en eau potable dans les îles canariennes et tout au long de la côte sud et est. L'Espagne et l'Italie dominent la capacité produite en Europe avec un pourcentage de 2.6% chacune de la capacité mondiale. 69% des unités de dessalement en Espagne utilisent la technique de l'osmose inverse. Alors que 20% des unités de dessalement en Italie utilisent la technique de l'osmose inverse. Le Japon

produit 3.7% de la capacité mondiale produite et utilise la technique de l'osmose inverse pour dessaler l'eau de mer depuis 1974, [45,46] La plus grande unité de dessalement d'eau saumâtre dans le monde, utilisant l'osmose inverse a été construite en 2006 en Jordanie, avec une capacité maximale de 150 000 m³ / j. L'Algérie a augmenté le nombre de ces unités de dessalement de 10 jusqu'à 40 pour l'an 2019, avec une capacité de production globale de 2 millions de m³ /j. A l'heure actuelle, la capacité totale de dessalement dans le monde est d'environ 95,37 millions de m³ /jour (34,81 milliards de m³ /an). Cette production est fournie par 15906 usines de dessalement opérationnelles ce qui représente environ 81% des usines de dessalement installées à travers le monde (20.000), [47] Les premières usines de dessalement, situées au Moyen-Orient, utilisaient principalement des technologies thermiques. Avant les années 1980, 84% de toute l'eau dessalée mondiale était produite par les deux principales technologies thermiques (Multi-stage-flash MSF, Multi-effet distillation MED). Avec la montée en puissance de la membrane, les technologies postérieures à 1980, en particulier l'osmose inverse, ont progressivement déplacé la domination des techniques de dessalement loin des technologies thermiques. En 2000, les volumes d'eau dessalée produite par les technologies thermiques (dominée par MSF) et osmose inverse RO étaient à peu près égaux à 11,6 millions de m³ / jour et 11,4 millions m³ / jour respectivement, représentant ensemble 93% du volume total d'eau produite (Fig 3.2). La production actuelle d'eau dessalée par osmose inverse s'élève désormais à 65,5 millions de m³/journée, représentant 69% du volume d'eau dessalée produite [47,48]

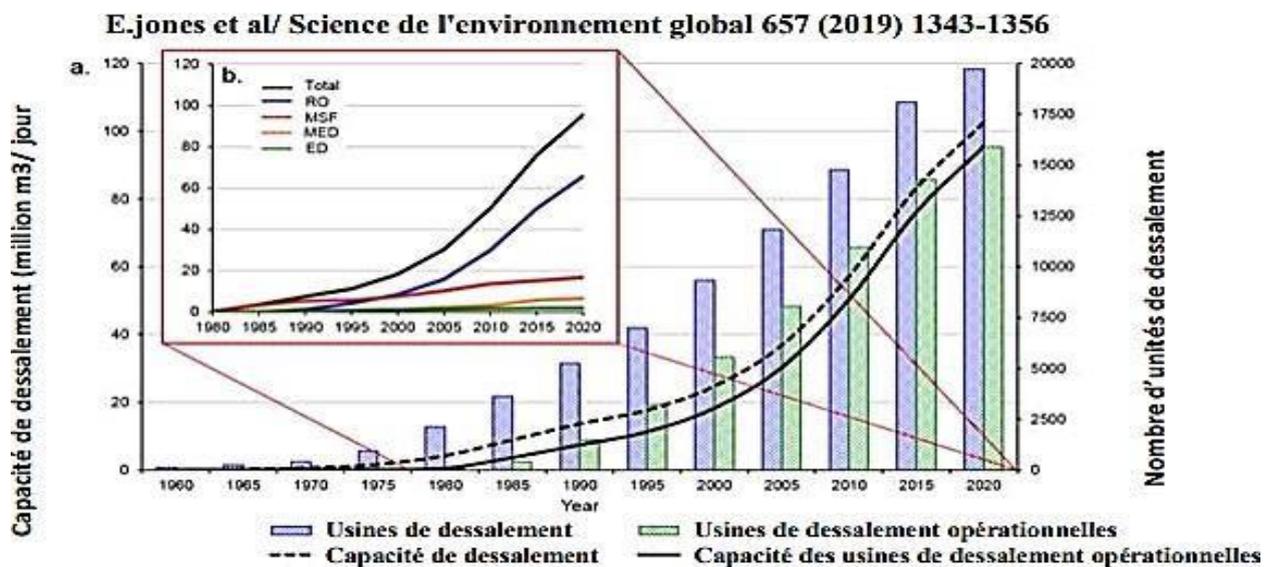


Figure 3.2 graphe résumant le nombre d'unités opérationnelles, l'évolution des capacités installées (a), l'évolution des capacités installées par technologies (b) [47]

III.2.1 :Évolution des capacités de dessalement en Algérie

Après avoir étudié les différentes technologies de dessalement ainsi que leur fiabilité et leurs coûts, le Ministère des ressources en eaux (MRE) a lancé un ambitieux programme de réalisation d'unités de dessalement des eaux non conventionnelles, [49] Entre 2002 et 2004, une étude sur le dessalement a été réalisée par le MRE dans le but de définir une stratégie de dessalement pour le court, moyen et long terme.

L'étude a porté sur 30 wilayas, 16 sur la côte et 14 à l'intérieur du pays, [49,50]. Le dessalement en Algérie est passé par deux grandes étapes. D'abord son apparition pour la première fois pour des fins industrielles à petite échelle, et dernièrement, sa nécessité pour palier au déficit d'eau potable et à l'approvisionnement de la population à grande échelle. Au tout début le dessalement en Algérie a été utilisé pour l'industrie (pétrochimie, industrie de l'acier) pour assurer la fourniture de l'eau [51,52], De chaudière, De refroidissement et de traitement.

En 1964, les toutes premières installations de dessalement en Algérie, trois petits blocs de 8 m³ chacun ont été installés au complexe à gaz liquéfié d'Arzew (ville côtière) à l'ouest du pays. En 1969, toujours à ARZEW une installation de capacité de production de 4560 m³ /j, utilisant le multi stage flash (MSF). En outre, dans des complexes de production d'électricité (Cap Djanet à l'est du pays) et l'industrie de liquéfaction (ARZEW et SKIKDA), des installations de dessalements sont mises en service afin de fournir de l'eau de haute pureté à ces derniers. Il y a également quelques installations qui sont destinées, principalement au sud, pour fournir de l'eau de qualité pour la consommation humaine dans des bases pétrolières.

Le tableau 3.1 résume quelques installations ainsi que leur année d'installation, capacité de production, lieu d'installation et le procédé utilisé. On remarque que de nombreux procédés ont été utilisés comme Électrolyse, Échanges d'ions, Distillations et osmose inverse.

On remarque aussi, que la plupart des unités sont de faible capacité de quelques dizaines à quelques centaines de mètres cube par jour. On notera bien qu'à l'inauguration de l'unité d'osmose inverse de Mostaganem, avec une capacité de 57600 m³ /j, était l'installation la plus importante du monde (1980). Cependant, la production réelle de ces unités est loin de refléter les chiffres avancés dans le tableau, Elle est estimée dans les années 90 à 2/3 des capacités installées, dans le meilleur des cas, ce qui n'as pas manqué de créer des problèmes très épineux

aux complexes industriels. [51,52]. D'autres unités de dessalements furent construites après entre 1990 et 2002 toujours pour des fins industrielles.

Mostaganem 1994 une unité pour traiter l'eau saumâtre utilise le procédé d'osmose inverse, dédié aux besoins de l'industrie du papier avec une capacité de 52.000 m³ /j.

Annaba 1996 une unité pour traiter de l'eau de mer utilise le procédé d'osmose inverse, utilisé par le groupe ASMIDAL avec une capacité de 5.148 m³ /j.

Tableau 3.1 : Installations de dessalement mises en service entre 1971 et 1982

Site	Nombre d'unités	Débit m ³ /j	Procédé	Mise en service
Skikda	1	1440	Flash	1971
Skikda	2	720	Flash	1971
Skikda		1440	Échangeurs d'ions	1971
Annaba	2	960	Échangeurs d'ions	1971
Annaba	2	3600	Échangeurs d'ions	1973
Ghazaouat	1	840	Échangeurs d'ions	1974
Arzew	6	3888	Échangeurs d'ions	1975
Arzew		960	Échangeurs d'ions	1975
Hassi Messaoud	6	1000	Électrodialyse	1975
Hassi Messaoud	2	110	Électrodialyse	1976
Gassi Touil	1	33	Électrodialyse	1977
Arzew	1	350	Thermocompression	1978
Annaba	3	14180	Multi flash	1978
Hassi Messaoud	2	350	Électrodialyse	1978
Bel abbes		1500	Échangeurs d'ions	1978
Haoud Berkaoui	1	35	Électrodialyse	1979
Hassi Messaoud	2	300	Électrodialyse	1979
Rhound El beghel	1	25	Électrodialyse	1979
Arzew	1	960	Multi flash (5 étages)	1979
Annaba	2	144	Échangeurs d'ions	1979
Annaba	2	576	Échangeurs d'ions	1979
Hassi-Rmel	3	792	Osmose d inverse	1979

Annaba	2	6240	Échangeurs d'ions	1980
Ghardaia		960	Échangeurs d'ions	1980
Arzew	1	960	Multi flash (6 étages)	1980
Mostaganem		57600	Osmose d'inverse (6 Lignes)	1980
Rhound El beghel	2	300	Électrodialyse	1981
Biskra		864	Osmose d'inverse	1981
Annaba	1	1800	Échangeurs d'ions	1981
Reghaia		160	Échangeurs d'ions	1982

En 2002 un programme comprenant 21 petites unités de dessalement avec une capacité de production totale de 57 000 m³ /j, a été lancé. Il se réparties comme suit [52] :

Régions d'Alger : 12 stations pour une capacité de production de 30 000 m³ /j.

Régions de Boumerdes et Tipaza : 01 station pour chaque région avec une capacité de production de 5 000 m³ /j.

Régions de Skikda : 04 unités pour une capacité de production de 10 000 m³ /j.

Régions de Tlemcen : 02 stations pour une capacité de production de 5 000 m³ /j.

Régions de Tizi-Ouzou : 01 unité pour une capacité de production de 2 500 m³ /j. D'autres installations ont été réalisées après le programme d'urgence parmi eux :

Arzew : unité de dessalement utilisant la distillation comme technologie, avec une capacité de 88 000 m³/j.

Bredea : unité de dessalement d'eau saumâtre utilisant le procédé d'osmose d'inverse, elle produise 34 000 m³/j.

Hamma (Alger) : une unité de dessalement avec une capacité de production de 200 000m³/j.

Actuellement, La capacité de production totale des unités en fonctionnement en Algérie est de 661 920 m³ /j, environ 47% de cette production est fourni par les procédés thermiques multi stages flash (MSF), et le distillateur multi effets (MED), 44% par le procédé membranaire

d'osmose inverse (OI), 5.5% fourni par le procédé de compression de vapeur et 3% par l'électrolyse (ED). Plus de 67% de la totalité de l'eau déminéralisée est de l'eau de mer, 22% à partir d'eau saumâtre et 8% à partir d'eau de rivières, le reste provient d'autres sources. La majorité de l'eau traitée est utilisée dans les municipalités avec environ 49% suivie par l'industrie avec 45%, le reste est utilisé pour l'énergie, le tourisme et l'armée ainsi que d'autres secteurs, [51].

III.3 : Les systèmes de dessalement

Le dessalement de l'eau est un processus technologique qui vise à éliminer les sels dissous et autres impuretés de l'eau salée ou saumâtre pour la rendre potable ou utilisable à des fins spécifiques.

Ce processus est essentiel dans les régions où les sources d'eau douce sont rares ou insuffisantes pour répondre aux besoins croissants en eau potable, en irrigation agricole et en industrie.

Chaque méthode de dessalement présente des avantages et des inconvénients en termes de coût, d'efficacité énergétique et de performance dans des conditions spécifiques.

Les installations de dessalement comprennent généralement des prétraitements pour éliminer les particules et les contaminants organiques de l'eau brute, des pompes pour augmenter la pression de l'eau, des dispositifs de traitement spécifiques basés sur la technologie choisie, des équipements de post-traitement pour ajuster la qualité de l'eau produite, et des systèmes de surveillance et de contrôle pour assurer le bon fonctionnement de l'installation.

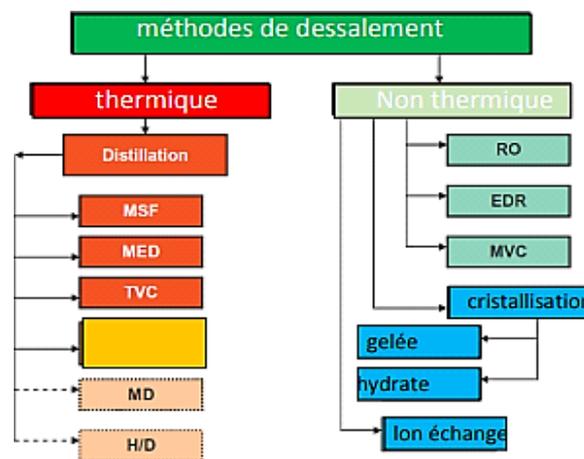
Bien que le dessalement offre une solution importante pour répondre aux besoins croissants en eau dans de nombreuses régions du monde, il présente également des défis, tels que la consommation énergétique élevée, la production de saumure concentrée pouvant avoir des impacts environnementaux, et les coûts initiaux et opérationnels élevés. Cependant, avec les progrès technologiques et l'innovation continue, le dessalement devient de plus en plus viable et accessible pour diverses applications.

II.3.1 : Classification des procédés de dessalement :

Les procédés de dessalement d'eau de mer sont classés selon la procédure utilisée dans le traitement de l'eau brute en deux catégories, la première catégorie regroupe les procédés qui

extraient l'eau pure de l'eau salée et la deuxième catégorie est une élimination des sels de l'eau brute. Cette dernière comprend deux procédés :

L'échange ionique et l'EDR. Une autre classification existe, elle est plus simple pour le classement des procédés de dessalement cette classification prend en compte le type d'énergie fournie pour le fonctionnement du procédé de dessalement elle se divise aussi en deux catégories : les procédés thermiques (distillation) et les procédés non thermiques (membranaire, congélation, échange d'ions).



La figure 3.3 représenteront la classification par procédés thermiques et non thermiques, [62].

III.3.2 : Les procédés de dessalement à énergie électrique :

III.3.2.1 : Osmose inverse (OI) :

Le phénomène de l'osmose entre deux solutions de concentrations salines différentes est le phénomène de la migration de l'eau de la solution la moins concentrée vers la plus concentrée. Comme son nom l'indique, l'Osmose Inverse procède à inverser le phénomène en forçant l'eau à plus forte concentration saline à travers la membrane semi imperméable qui va stopper les sels et laisser passer l'eau dessalée. Ces membranes sont généralement enroulées en spirale à l'intérieur d'un tube afin d'augmenter la surface de filtration [68]. Une unité de la membrane OI (figure 3.4) se compose de quatre éléments de base [64,68] :

- Prétraitement
- Pompes à haute pression
- Bloc membrane
- Post-traitement

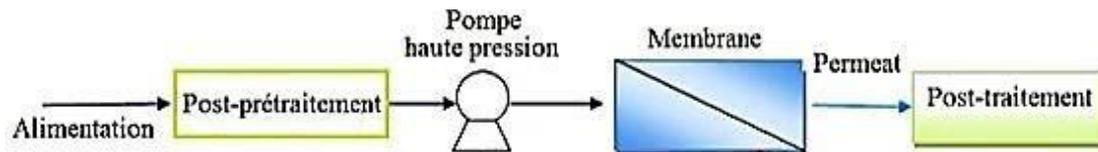


Figure 3.4: schéma d'une unité de dessalement Osmose Inverse OI.

Il y a deux catégories de procédés de prétraitement : les prétraitements physiques et les prétraitements chimiques. Les prétraitements physiques utilisent les préfiltres mécaniques, les filtres à cartouche, la filtration à sable et la filtration membranaire. Le Prétraitement a pour objectif la réduction du colmatage, l'augmentation de la durée de vie des membranes, l'amélioration de la qualité de l'eau produite et la maintenance des performances de l'osmose inverse. Le prétraitement chimique consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de coagulant, de désinfectants et de poly électrolytes.

Le Prétraitement a pour objectif la maintenance des performances de l'osmose inverse, à travers la réduction du colmatage, l'augmentation de la durée de vie des membranes, et l'amélioration de la qualité de l'eau produite, [64]. La pompe haute pression permet ensuite d'injecter l'eau de mer sous une pression de l'ordre de 50 à 80 bars en fonction de la salinité et de la température de l'eau dans le module d'osmose inverse [69]. Le bloc membranaire se constitue de plusieurs modules. Les deux modules commerciaux les plus fréquents dans le marché sont les modules spiraux et le à fibres creuse [64]. Dans des modules spiraux (figure I.3), une membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux (le collecteur du perméat) qui recueille le filtrat, formant un cylindre multicouche où le perméat à s'écoulé selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux [72]. Le post traitement a pour objectif de rendre l'eau traitée prête pour la consommation.

III.3.2.2 : Électrodialyse conventionnelle

L'électrodialyse est un procédé qui utilise un empilement de membranes échangeuses d'ions disposées en alternance orthogonalement à un champ électrique [64]. Dans une unité d'électrodialyse se trouvent les membranes cationiques (perméables aux cations) MEC et les membranes anioniques (perméables aux anions) MEA. Ces membranes sont disposées parallèlement et de manière alternée (figure 3.5). Sous l'action du champ électrique, les MEC bloquent les anions et laissent passer les cations, tandis que les MEA bloquent les cations et laissent passer les anions. Il se crée alors, des compartiments de concentration (concentras) et d'autres de dilution (diluats). Les solutions sont renouvelées dans les compartiments par une circulation parallèle au plan des membranes. L'injection du courant dans le système est assurée par deux électrodes, anode et cathode, parallèles au plan des membranes et placées aux extrémités de l'électro dialyseur [61].

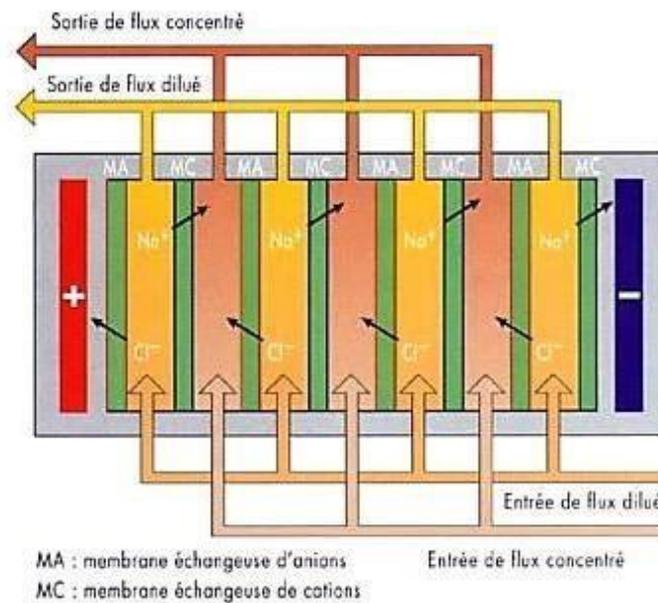


Figure 3.5: schéma d'une unité d'électrodialyse ED.

III.3.2.3 Distillation par compression mécanique de vapeur (MVC) :

Le procédé de distillation par compression de vapeur (VC) est utilisé pour des installations de dessalement de petites ou moyennes capacités [68].

L'eau à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte isolée thermiquement, et la vapeur produite est aspirée par un compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire et se condense en provoquant l'ébullition de l'eau salée [69] (figure 3.6). Ce procédé fonctionne uniquement avec de l'énergie électrique. Cependant, on peut lui associer un échangeur thermique pour récupérer la chaleur perdue par les gaz d'échappement, ou les fumées de combustion.

On réchauffera ainsi à peu de frais, l'eau de mer avant son admission dans l'évaporateur [75]. Ce procédé permet d'obtenir une production maximale de 5000 m³ /Jour avec une salinité de 1 à 50 mg/pour une consommation énergétique de 12 à 17 kWh/m³ d'eau produite [64,66].

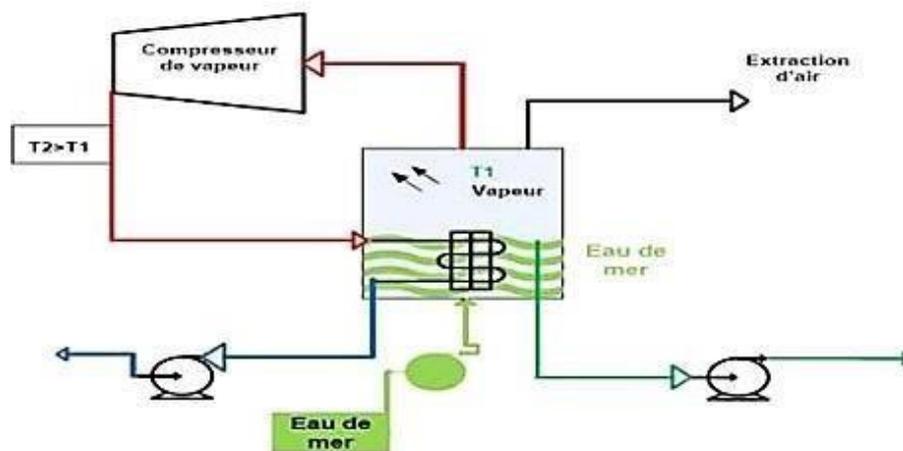


Figure 3.6 : schéma d'une unité de distillation par compression mécanique de la vapeur MVC.

II.4: Les procédés de dessalement à énergie thermique :

Plusieurs procédés existent du plus simple à de faible production journalière jusqu'au procédés dit industriel à grande production journalière. Dans cette partie on va citer les procédés de dessalement d'eau les plus pertinents qui utilisent l'énergie thermique comme source principale pour leurs fonctionnements, [62].

III.4.1 : M.S.F : (multi effet stage flash):

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120 °C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore (voir figure 3) puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible.

La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle. Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120 °C, l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120 °C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité.

On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un dévésiculateur constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte.

L'avantage principal du procédé MSF est que l'évaporation de l'eau de mer ne se produit pas autour des tubes de chauffe puisque le liquide « flashe » ceci limite les risques d'entartrage.

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière, cette énergie peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur basse pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique. Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer.

Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m³ d'eau dessalée par jour.

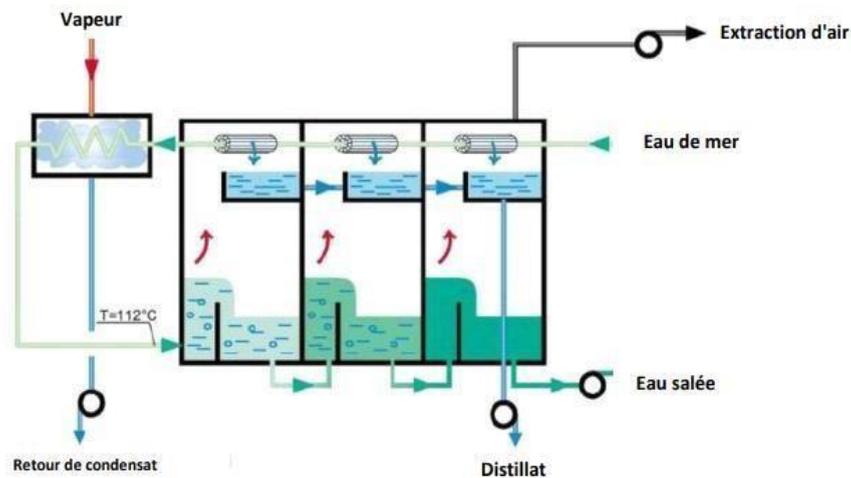


Figure 3.7 : schéma d'un multi stage flash MSF

III.4.2 : Distillation membranaire (DM) :

La Distillation Membranaire (DM) est un procédé hybride combinant un procédé thermique et un procédé à membrane. La membrane met en contact direct un liquide côté alimentation et une phase liquide ou gazeuse côté perméat.

La différence de pression produite par l'eau de mer réchauffée entre les deux côtés de la membrane provoque l'évaporation de l'eau du côté alimentation, et seule la vapeur passe au travers de la membrane hydrophobe pour aller se condenser grâce à l'eau de refroidissement et est finalement recueillie à l'état liquide. Il existe quatre variantes principales du procédé DM [70] :

- Distillation membranaire directe (DMD)
- Distillation membranaire air gap (DMAC)
- Distillation membranaire sous vide (DMV)
- Distillation membranaire à entrainement gazeux (SGMD)

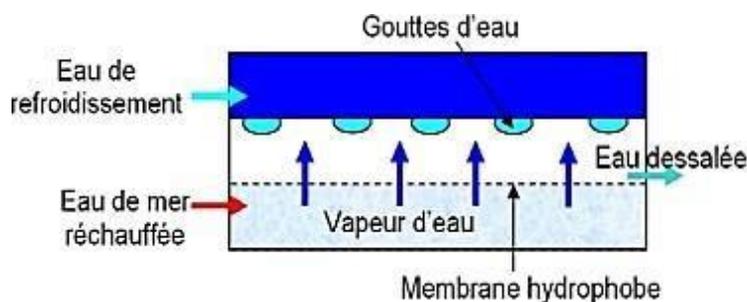


Figure 3.8: Principe de la distillation membranaire

III.4.3 : Distillation à multi effets (MED) :

Alors que le procédé MSF se réalise par détente au niveau d'étages successifs, le procédé MED quant à lui opère par transfert de chaleur au niveau d'une surface d'échange, par une vapeur produite par une chaudière, ou bien par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. De même que dans le procédé MSF, la pression décroît dans le procédé MED d'un effet à l'effet suivant ; la pression dans le premier effet est d'environ 0,3 bars [67].

La vapeur produite dans le premier effet à basse pression est condensée pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet où la pression est inférieure à celle du premier effet. La chaleur de condensation qu'elle dégage va déclencher l'évaporation d'une partie de l'eau de mer contenue dans le deuxième effet, et ainsi, l'opération se répète d'effet à effet, [68].

Du point de vue économique, le procédé MED est moins coûteux et plus efficace que le procédé MSF du point de vue consommation d'énergie, et du point de vue du ratio de performance, du moment qu'il permet d'obtenir une production journalière de 10 000 à 25 000 m³ avec une salinité de 1 à 50 mg/l pour une consommation énergétique de 1 à 2 kWh/m³ d'eau produite [62]. Le MED est donc plus économique et plus efficace que le MSF.

L'économie des unités MED est proportionnelle au nombre d'effets [69] (limité par l'écart de température)

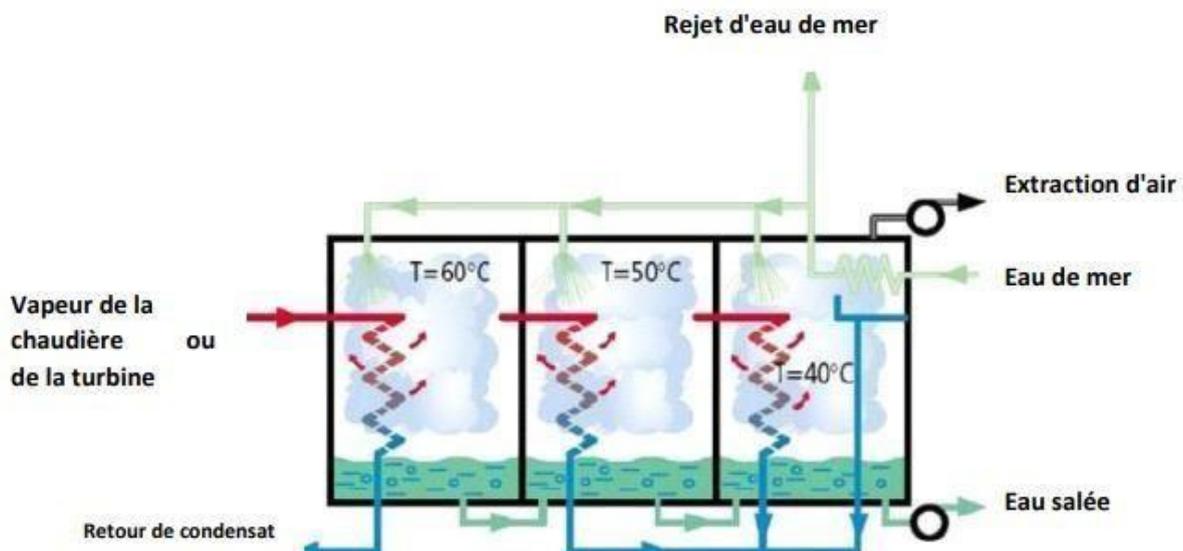


Figure 3.9: schéma d'un Multi Effet Distillation MED

III.4.3.1 : Type des systèmes MED :

Le système de dessalement multi-effets conventionnel (MEB) est la méthode la plus ancienne utilisée pour dessaler l'eau de mer en grandes quantités.

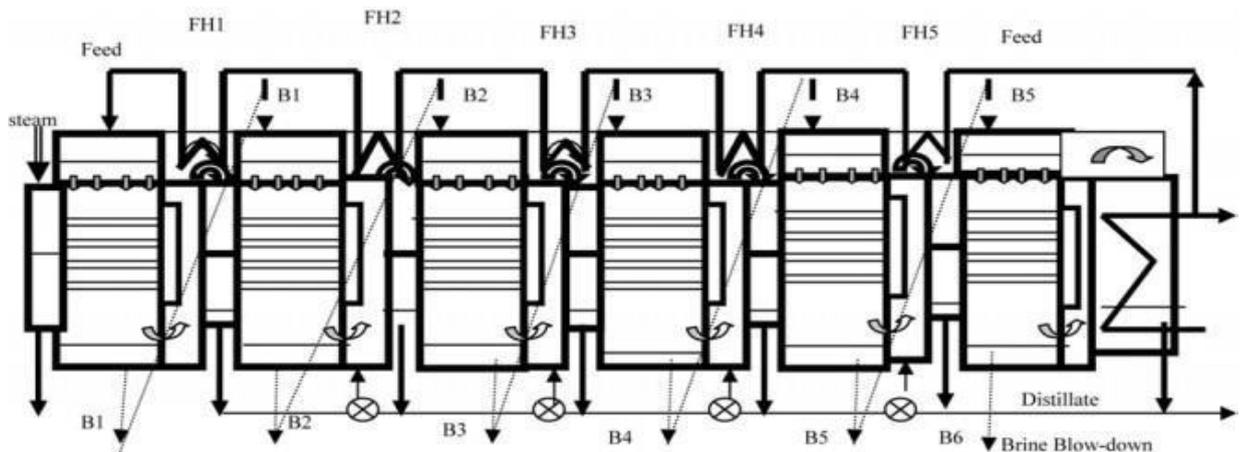


Figure 3.10 : Alimentation en avant multi-effet bouillonnant avec des réchauffeurs d'alimentation régénératifs.

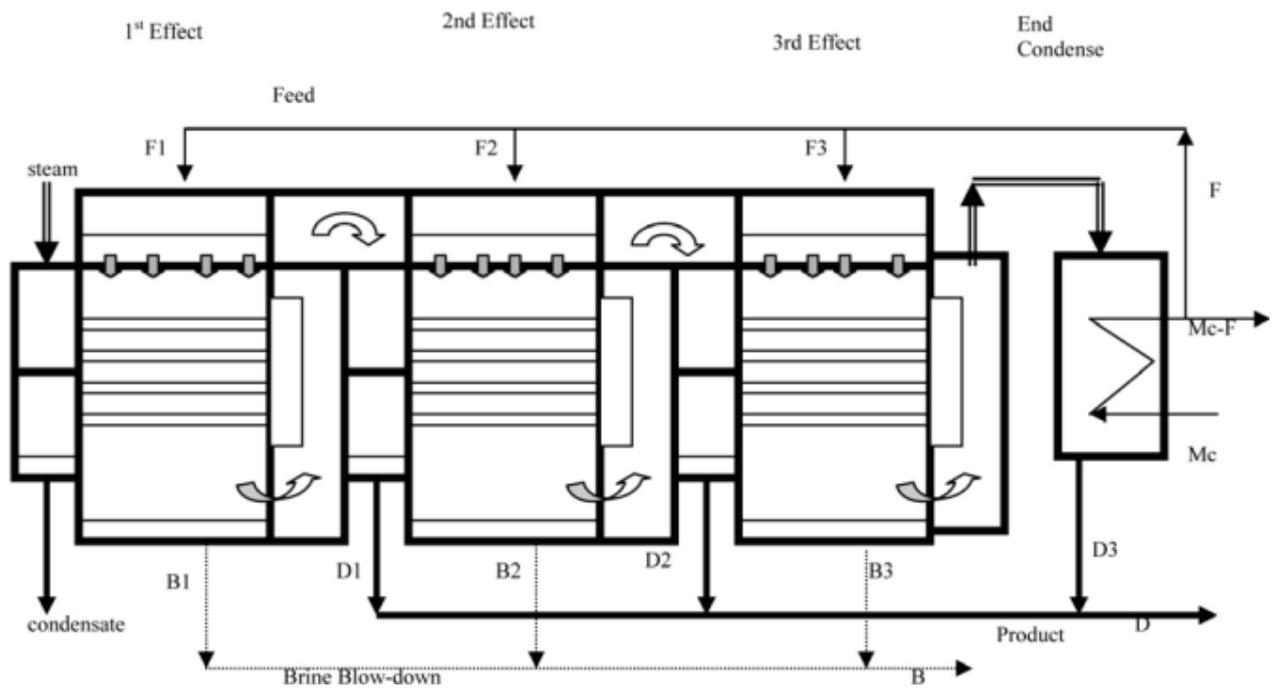


Figure 3.11 : Unité de dessalement multi-effets à alimentation parallèle sans pré-réchauffeurs.

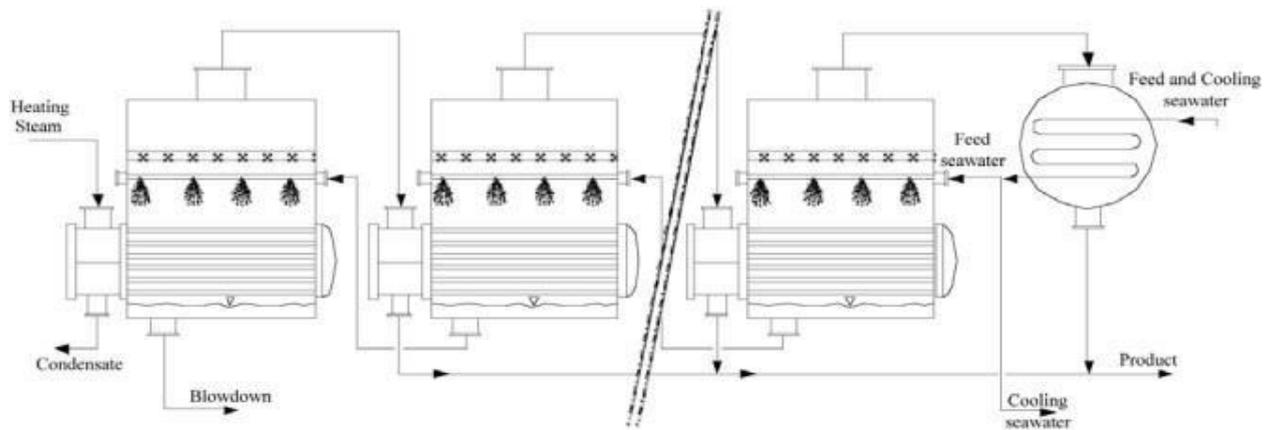


Figure 3.12 : Système de dessalement multi-effets à alimentation inverse utilisant des évaporateurs à tubes horizontaux.

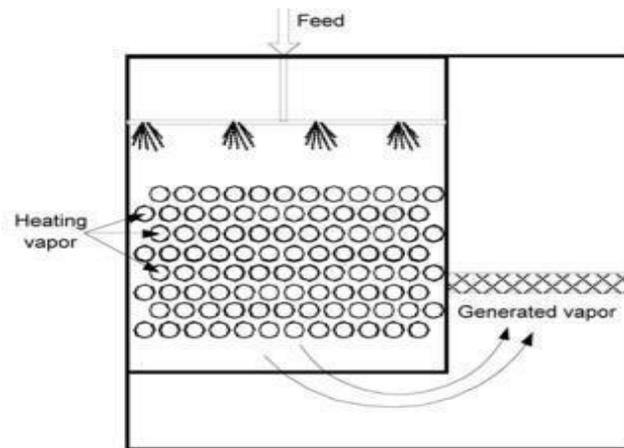


Figure 3.13 : Évaporateur à film tombant horizontal à tubes.

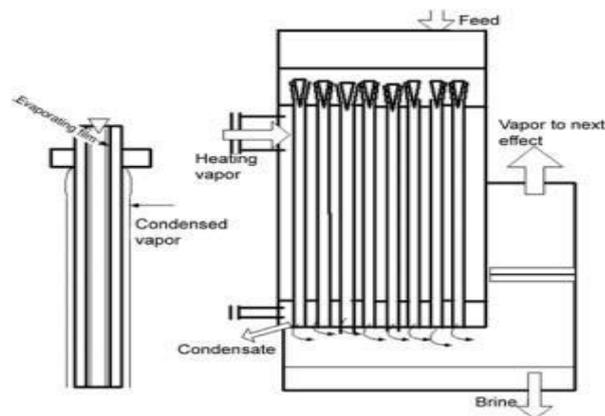


Figure 3.14 : Évaporateur à film tombant à tubes verticaux.

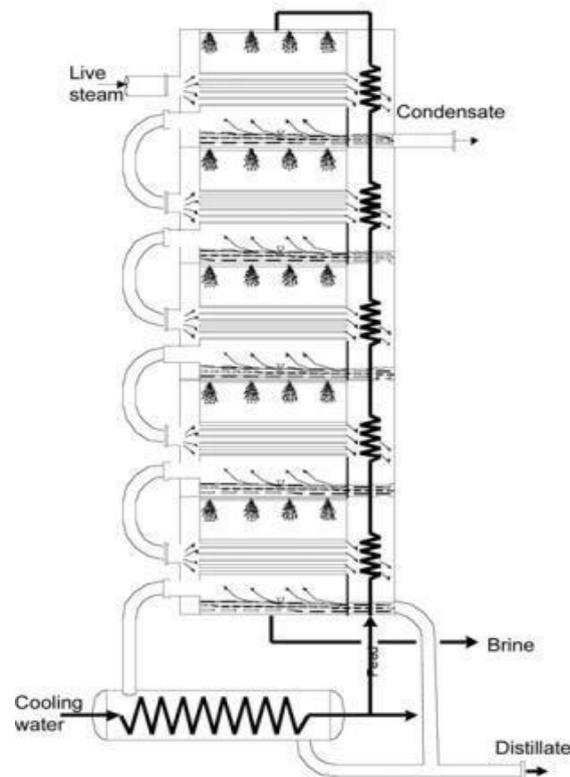


Figure 3.15 : Système de dessalement multi-effets avec des évaporateurs empilés verticalement [2].

III. 5: Problématique de l'impact environnemental du dessalement :

Toutes les technologies de dessalement entraînent des risques et imposent à l'environnement des rejets nocifs à son équilibre. Le dessalement affecte l'environnement aussi bien dans l'air et l'atmosphère que dans les sources d'eau, [76] L'utilisation de la chaleur et de l'énergie Électrique durant le processus de dessalement produit des émissions de CO₂. Que la source d'énergie soit électrique ou thermique, des volumes importants de CO₂ et d'autres gaz sont produits et émis dans l'atmosphère. D'ici 2050, les besoins annuels de dessalement de la région MENA devraient être d'environ 90 km³. Si ce volume d'eau dessalée était produit par un mélange pétrole-gaz en utilisant la distillation à effets multiples (MED), les émissions de CO₂ produites proportionnellement à ce volume d'eau dessalée seraient comprises entre 270 et 360 millions de tonnes par an, [76]. Par ailleurs, quelle que soit la source d'alimentation, le dessalement produit une saumure concentrée qui doit être éliminée pour diminuer l'impact environnemental. La distillation thermique produit trois fois plus de saumure par unité d'eau

Douce générée que l'osmose inverse (OI). Dans le cas de terres intérieures l'élimination de la saumure est une question beaucoup plus complexe et coûteuse lorsque l'Osmose Inverse est utilisée. Les principaux risques du prélèvement de l'eau et du rejet de l'eau polluée sont :

- Le piégeage de la vie marine du côté de la prise d'eau
- Et les effets du rejet direct de saumure à haute température et chargée de produits chimiques provenant des usines de dessalement sur les organismes et les environnements marins.

Bien que le golfe d'Arabie, la mer Rouge et la mer Méditerranée soient des bassins fermés, les impacts de l'élimination de la saumure varieront considérablement dans la région MENA car ces mers diffèrent considérablement, [77,78] La Convention de Barcelone de 1976 « vise à réduire la pollution de la mer Méditerranée et à protéger et améliorer l'environnement marin de la région, contribuant ainsi à son développement durable ». Cela n'empêche pas la Méditerranée d'être très polluée, [76]. Il existe différentes méthodes d'élimination de la saumure en fonction de l'importance du dessalement, de la sensibilité des organismes récepteurs et du coût de cette élimination sûre. Les options d'élimination concerneront la saumure marine et la saumure à l'intérieur des terres non costales. Ces deux cas auront des options différentes, [76]. L'élimination de la saumure marine

Rejet des eaux de surface, contenant de la saumure marine. Méthode largement pratiquée dans la plupart des dessalements d'eau de mer.

Évacuation par les égouts. Principalement pour les usines de dessalement à petite échelle. L'élimination de la saumure à l'intérieur des terres.

Puits profond d'injection. Pratiqué pour le dessalement des eaux saumâtres où les impacts négatifs de telles injections ne nuisent pas à la qualité des aquifères. Une étude hydrogéologique détaillée est une condition préalable pour déterminer la sécurité de cette pratique.

Bassin d'évaporation. Généralement appliqué pour les usines de dessalement à petite échelle et pour le dessalement des eaux saumâtres.

L'option zéro rejet de liquide a tendance à être l'une des plus chères. Habituellement pratiquée pour le dessalement industriel de l'eau, ou lorsque les effluents des usines de dessalement sont utilisés pour les industries chimiques telles que la production de sel.

Rejet direct sur le sol. Praticué pour les plantes à petite échelle et là où la terre est relativement peu coûteuse et facilement disponible. L'utilisateur doit s'assurer d'atténuer tout impact négatif sur l'environnement.

III. 6: Gestion environnementale de l'élimination de la saumure à l'intérieur des terres :

Contrairement au dessalement de l'eau de mer, l'OI à l'intérieur des terres et l'élimination de la saumure à l'intérieur des terres qui en résulte présentent un risque potentiel élevé de pollution des eaux douces de surface et des eaux souterraines. L'élimination de la saumure à l'intérieur des terres peut également endommager de manière irréversible les sols et les systèmes écologiques. Il existe très peu de données sur les coûts de l'élimination de la saumure dans les zones non côtières. La plupart des techniques sont très coûteuses par rapport au rejet dans la mer, les eaux de surface ou les égouts.

III. 7: L'énergie nécessaire pour le dessalement :

Les processus de dessalement sont une solution mature techniquement pour un approvisionnement illimité en eau douce. Cependant leur grande consommation énergétique pose un challenge majeur. Tous les processus de dessalement ont pour but de séparer la solution saline en une eau pure et une eau concentrée en sels (la saumure). Théoriquement, les processus de dessalement pour effectuer ce partage nécessitent un minimum d'énergie. Différentes méthodes ont été utilisées pour le calcul de l'énergie minimale nécessaire pour le dessalement, passant par la formule de Van Hoff pour une eau de mer d'une salinité de 33,000 ppm à une température de 25°C, le travail minimal nécessaire est de 0,77 kWh/m³ [79,80], et est égal à la différence en énergie libre entre l'eau d'alimentation (eau de mer) et les flux sortant (eau produite et la saumure déchargée). L'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'une usine de dessalement est de 5 à 26 fois l'énergie minimale nécessaire calculée théoriquement. Elle dépend du type de procédé utilisé et des caractéristiques de l'unité de dessalement. Les techniques de dessalement utilisent soit de l'énergie électrique par exemple les techniques membranaires comme l'osmose inverse RO, l'électrodialyse ED, ou le mécanique vapor

compressor MVC qui une technique thermique mais qui utilise l'électricité comme source primaire, soit l'énergie thermique comme source primaire et l'énergie électrique d'une façon secondaire pour le fonctionnement des pompes de circulation dans le system comme pour le Multi Stages Flash MSF, le Multi Effet Distillation MED, et le Thermal vapor compressor TVC, [79]. Pour les installations de dessalement de petite capacité, les sources d'énergie alternatives thermiques ou non thermiques sont aisément applicable et conviennent pour cette sorte de système. Sont entendues par sources d'énergie alternatives les énergies renouvelables, (le solaire, le vent, les vagues, la géothermie et la biomasse).

III. 8: CONCLUSION :

La technique de dessalement propose plusieurs procédés pour atteindre son but qui est d'adoucir l'eau salée. Ces procédés ont plusieurs classifications selon leur mode d'élimination du sel, selon leur type d'énergie (thermique ou électrique). Chaque procédé présente des avantages et des inconvénients, et doit répondre à certains critères pour son application. Le choix du procédé de dessalement est spécifique pour chaque cas individuellement. En fonction du but d'utilisation de l'eau traitée, (approvisionnement public en eau, agricole, ou industriel), des caractéristiques de la source d'eau à traiter, (eau de mer, eau saumâtre), des conditions locales, (conditions climatiques, ressources humaines, etc.). A tous ces critères, s'ajoute l'étude de l'impact environnement, qui est indispensable avant l'installation de tout système de dessalement, afin d'apporter une solution réelle, et non pas aggraver la situation.

CHAPITRE IV :
Modélisation mathématique de l'unité MED

INTRODUCTION :

D'après l'analyse des procédés de dessalement et des combinaisons possibles avec les systèmes d'énergie thermique ou électrique effectuée au troisième chapitre, nous proposons d'utiliser la technologie de distillation à effets multiples (MED) pour traiter les eaux souterraines saumâtres. Ce choix a été fait pour plusieurs raisons énumérées ci-dessous.

- La technologie MED est flexible en ce qui concerne la concentration et la variation de la salinité.
- La technologie MED a un taux de récupération plus élevé qui conduit à une empreinte eau minimale (moins de rejet de saumure).
- La technologie MED peut être directement couplé à l'énergie solaire thermique ou à une source de récupération d'énergie thermique.
- La technologie MED nécessite moins d'entretien et n'a pas besoin de hautes qualifications.
- La technologie MED est une technologie très mature d'une grande robustesse (des stations MED dans le golfe arabe ont dépassé 40 ans et fonctionnent encore.)

Dans la région étudiée, les eaux saumâtres présentent des niveaux variables de salinité et de composants, ce qui rend l'utilisation de MED plus favorable.

Dans ce chapitre on a procédé le processus MED et à la modélisation mathématique du système de dessalement proposé, afin d'étudier le comportement de ce dernier en fonction de plusieurs paramètres. Puis on va comparer un système MED standard avec un système MED modifié.

IV. 1: Description du processus MED

La distillation multi-effets est un procédé qui repose sur un changement de phase pour séparer l'eau du sel par évaporation. L'eau salée est chauffée dans un évaporateur avec une source de chaleur, qui peut être liquide ou vapeur, prélevée sur une chaudière spéciale, une turbine de production d'électricité, un système solaire thermique ou une source d'énergie résiduelle. L'eau salée est chauffée à son point d'ébullition qui dépend du niveau de sel dans l'eau et la pression à l'intérieur de l'évaporateur, puis une partie de celui-ci est évaporé et la séparation de l'eau et du sel est faite. Pour obtenir l'eau dessalée à la fin, la vapeur générée est condensée dans un condenseur. Afin d'éviter les problèmes d'entartrage et de corrosion des tubes ce qui conduirait à une réduction de l'efficacité du transfert de chaleur et de la durée de vie des composants, la vapeur générée est transportée vers le condenseur à travers un dévésiculeur pour arrêter les gouttelettes de saumure mélangées avec la vapeur générée [80,81]. Le condenseur a deux objectifs dans ce processus, condenser la vapeur générée pour produire un dessalement l'eau et préchauffer l'eau d'alimentation de l'évaporateur. L'eau de refroidissement dans le condenseur élimine l'excès de chaleur de la vapeur générée qui lui a été ajoutée dans l'évaporateur par la source de chaleur. La chaleur fournie à l'évaporateur est transférée de la source de chaleur à la vapeur générée, ce transfert dégrade sa qualité, ce qui signifie que l'évaporateur ne consomme pas toute la chaleur fournie. D'un point de vue énergétique, les plus grosses pertes se produisent dans le condenseur, car une partie seulement du refroidissement de l'eau sera envoyée à l'évaporateur comme eau d'alimentation, et l'eau de refroidissement restante est rejetée à sa source avec la chaleur retirée de la vapeur générée [81]. Dans un système d'évaporation à simple effet, la masse d'eau produite est inférieure à la masse de vapeur de chauffage utilisée pour faire fonctionner le système. Ce taux dans les technologies de dessalement thermique est défini comme le rapport de performance thermique, ce qui est inférieur à 1 pour ce système. Concernant cette faible performance thermique, le système d'évaporateur à simple effet n'a pas d'utilisation pratique à l'échelle industrielle [82]. Afin d'améliorer le rapport de performance thermique, plusieurs effets (évaporateurs) sont connectés en série pour utiliser l'énergie fournie au premier effet pour générer de la vapeur autant de fois que possible, cela donne place à une installation de distillation multi-effet MED. Cela signifie que plus le nombre d'effets est élevé, plus le rapport de performance thermique est élevé. Mais pour certaines limitations techniques, le nombre d'effets est limité dans les applications réelles. Ces limitations sont dues à la différence de température entre la température de condensation du premier effet et la

température de condensation dans le condensateur final. La température du premier effet est limitée par les conditions de détartrage au sulfate de calcium jusqu'à 120 °C en tant que température maximale de la saumure, et la dernière température du condenseur est limitée à la source de température de l'eau de refroidissement (eau de mer ou autres sources) [83]. De plus, la différence de température typique entre les effets pour le système MED est dans la fourchette de 1,5°C à 2,5°C [140]. Entre ces deux températures chaude et froide, le nombre d'effets est choisi en fonction du taux de production de conception, le rapport de performance requis, et l'impact économique du coût initial qui augmente avec le nombre d'effets [83]. L'unité MED peut être configurée de différentes manières en ce qui concerne la direction de l'eau d'alimentation et de la vapeur générée d'un effet à l'autre. Dans ce cas, ils sont trois types d'arrangements possibles, le feed-back arrangement le plus utilisé où l'eau d'alimentation et le flux de vapeur générée dans le même sens, son avantage est que la moindre salinité est à haute température dans le premier effet. L'arrangement d'alimentation parallèle et l'arrangement de rétro alimentation qui est rarement utilisé dans le dessalement pour le grand risque d'entartrage puisque le premier effet à la température et la salinité les plus élevées. Le choix de la meilleure configuration dépend des conditions de fonctionnement [84]. De plus, il existe deux façons de connecter les effets ensemble, dans le premier les effets sont connectés horizontalement. Cette configuration est la plus utilisée dans les unités à grande échelle en raison de sa stabilité et de sa simplicité de fonctionnement et maintenance. Dans le second, les effets s'enchaînent verticalement [83]. Pour atteindre un rapport de performance thermique plus élevé, l'unité MED peut être combinée avec un compresseur de vapeur mécanique (MVC), ou un compresseur de vapeur thermique (TVC), ou une pompe à chaleur à absorption et adsorption (ABHP, ADHP). La combinaison la plus utilisée est le MED-TVC pour sa simplicité et son efficacité, même si le MED-ABHP et le MED-ADHP montrer une meilleure efficacité que le MED-TVC mais il est encore à une échelle de laboratoire [84]. Dans cette étude, une simple distillation multi effets MED système est considéré à la place du MED-TVC ou MED-HP système car les deux derniers nécessitent une source à haute énergie thermodynamique à exploiter. La configuration MED considérée est présentée dans Fig. 4.1 Le système a n nombre d'effets (évaporateurs) en série, n-1 préchauffeurs d'eau d'alimentation, un condenseur final.

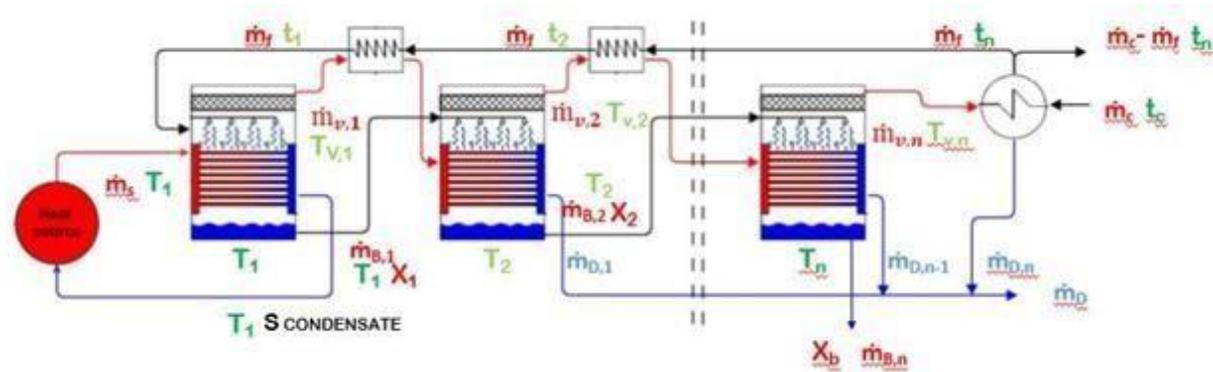


Figure 4.1 : configuration MED standard

IV.2: LES EQUATIONS

IV.2.1 : Équations des préchauffeurs

Dans tous les préchauffeurs, la même quantité de vapeur provenant de l'effet précédent ($\dot{m}_{v,i}, T_{v,i}$) est condensé pour chauffer l'eau d'alimentation de T'_{i+1} à T'_i en utilisant la chaleur dégagée par condensation, cette fraction est égale à $y m_f$. Les équations pour tous les Préchauffeurs sont mathématiquement similaires :

• Bilan énergétique :

$$y \dot{m}_f L = \dot{m}_f C_p \Delta T \tag{1.1}$$

Où y est calculé par :

$$y = C \Delta T / L \tag{1.2}$$

• Équation de transfert de chaleur :

$$Q_{ph,i} = A_{ph,i} U L MTD_{ph} = \dot{m}_f C_p \Delta T \tag{1.3}$$

Où LMTD est la méthode de la différence de température moyenne logarithmique est donnée

par :

$$LMTD_{ph} = \frac{(T_{v,i} - T'_{i+1}) - (T_{v,i} - T'_i)}{\ln(T_{v,i} - T'_{i+1}) / (T_{v,i} - T'_i)}$$

IV.2.2 : Équations des effets :

Comme décrit précédemment, le comportement des effets est le même sauf pour le premier, c'est pourquoi les équations utilisées pour le premier effet ne sont pas les mêmes que les autres. Pour le premier effet, le bilan massique permet d'écrire :

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{B,1} + \dot{m}_{bv,1} \quad (1.5)$$

IV.2.2.1 : Le bilan salin permet d'écrire :

$$X_f m_f = X_{B,1} m_{B,1} \quad (1.6)$$

IV.2.2.2 : Le bilan énergétique s'écrit :

$$\dot{m}_{bv,1} L = \dot{m}_s L - \dot{m}(T_1 - T_1') \quad (1.7)$$

IV.2.2.3 : Les équations de transfert de chaleur :

$$Q_s = A_{eff,1} U (\Delta T - BPE) = \dot{m}_s L \quad (1.8)$$

Dans le premier effet, l'eau distillée n'est pas produite et la vapeur est générée juste par ébullition parce que la température l'eau d'alimentation est inférieure à la température de saturation de l'effet.

Pour les effets de 2 à n, le bilan massique s'écrit :

$$\dot{m}_f = \dot{m}_B + \dot{m}_v \quad (1.9)$$

$$\text{Où } \dot{m}_f = \dot{m}_{B,-1} ; \dot{m}_{v,i} = \dot{m}_{bv,i} + \dot{m}_{fv,i} \text{ et } \dot{m}_{fv,i} = y \dot{m}_{B,i-1} \quad (2.0)$$

Pour les effets de 2 à n, le bilan massique s'écrit :

$$\dot{m}_f = \dot{m}_B + \dot{m}_{v,i} \quad (2.1)$$

$$\text{Où } \dot{m}_f = \dot{m}_{B,-1} ; \dot{m}_{v,i} = \dot{m}_{bv,i} + \dot{m}_{fv,i} \text{ et } \dot{m}_{fv,i} = y \dot{m}_{B,i-1} \quad (2.2)$$

Concernant le bilan salin, on a :

$$X_{B,\dot{m}_B,i} = X_{B,i-1} \dot{m}_{B,i-1} \quad (2.3)$$

Et les équations de transfert de chaleur :

$$Q_{eff} = A_{eff}U (\Delta T - BPE) = \dot{m}_{bv} L \quad (2.4)$$

Où \dot{m}_{bv} est la vapeur générée par l'ébullition et c'est le même pour tous les effets.

$$\dot{m}_{bv} = \beta \dot{m}_D \quad (2.5)$$

and

$$(2.6) \quad \beta = \left(\frac{1}{1-(1-y)^n} - \frac{m_f}{m_D} \right) y$$

=

La démonstration est donnée dans Darwish et al, [21] papier.

IV.3: Modélisation mathématique

La modélisation mathématique est une discipline fondamentale qui utilise des techniques analytiques et statistiques pour représenter et comprendre des phénomènes complexes dans divers domaines scientifiques. En combinant des théories mathématiques avec des données empiriques, elle permet de formuler des modèles qui capturent les dynamiques et les interactions de systèmes réels. Ces modèles offrent non seulement des outils puissants pour prédire le comportement futur des systèmes, mais également pour tester des hypothèses, optimiser des processus et prendre des décisions éclairées.

IV.3.1 : Modélisation mathématique de l'unité MED :

Le modèle mathématique utilisé dans cette étude est un modèle simple développé par Darwish Et al, [24]. Ce modèle comprend les lois thermodynamiques de base, les équations de transfert de chaleur et relations thermodynamiques, et les phénomènes les plus importants du processus.

Pour simplifier l'analyse et le modèle, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- Fonctionnement en régime permanent : Pour un mécanisme le régime permanent est atteint lorsqu'il fonctionne à vitesse constante.
- Mêmes différences de température entre les effets et préchauffeurs
- Vapeur générée égale par ébullition dans chaque effet
- Chaleur spécifique constante C pour la saumure et l'eau d'alimentation

CHAPITRE IV Modélisation mathématique de l'unité MED

- Chaleur latente constante
- Les vapeurs formées sont sans sel
- Les pertes d'énergie vers l'environnement sont négligeables

Le modèle est utilisé pour générer les données suivantes :

- Distribution des débits de saumure et de distillat
- Distribution de la concentration en sel
- la surface des échangeurs
- Débits d'eau d'alimentation
- Débits de la source de chaleur
- Débit d'eau de refroidissement
- GOR (gain output ratio), le ratio de performance, et d'autres taux caractéristiques de l'unité MED.

Les données d'entrée pour la modélisation, telles que la salinité de l'eau d'alimentation, le débit massique du produit l'eau, la température de la source de refroidissement et la température de la source de chaleur sont données comme suit

Salinité de l'eau d'alimentation	Xf	4 g/L
Débit massique d'eau produite	mD	57,8 kg/s
Température de la source de refroidissement	TC	25°C
Température de saumure supérieure	TBT	De 65°C à 100°C

Le bilan massique de toutes les unités MED en régime permanent suppose que le débit d'eau D'alimentation est égal à la somme de l'eau distillée (mD) et de la saumure rejetée (mB) :

$$\dot{m}_f = \dot{m}_B + \dot{m}_D \quad (2.7)$$

Le bilan de concentration en sel pour cette équation :

$$X_f \dot{m}_f = X_B \dot{m}_B + X_D \dot{m}_D \quad (2.8)$$

Si $X_D = 0$, l'eau produite est exempte de sel. À partir des équations (3.26) et (3.27), le débit d'eau nécessaire pour une capacité de distillation d'eau connue est donné par :

$$\dot{m}_f = \dot{m}_D \quad (2.9)$$

Où X_f est connu à partir des données sur la qualité de l'eau d'alimentation et X_B est limité par

La température du dernier effet dans la configuration d'alimentation directe selon le diagramme

De solubilité du sulfate de calcium [21]. La différence de température entre les effets ΔT et les préchauffeurs $\Delta T'$ sont donnés par :

$$\Delta T = \frac{T_{BT} - T_n}{n - 1} \quad (3.0)$$

Où T_{BT} est la température maximale de la saumure dans le premier effet et T_n est la température

Du dernier effet. La distribution de la température à l'intérieur des effets et des préchauffeurs est calculée respectivement par les équations suivantes :

$$T_{i+1} = T_i - \Delta T \quad (3.1)$$

$$T_{i+1}' = T_i' - \Delta T' \quad (3.2)$$

IV.3.2 : Équations du Condenseurs :

Pour condenser la vapeur générée par le dernier effet, un condenseur final est utilisé. Ce dernier est un condenseur à eau que nous avons remplacé par un hybride composé d'un condenseur à eau connecté en série avec un condenseur à air (Fig. 4.1). Les résultats simulés pour les deux cas ont été comparés et discutés. Pour le cas où le condenseur à eau est utilisé, les équations suivantes ont été utilisées pour le bilan énergétique et transfert de chaleur.

$$\dot{m}_v, L = \dot{m}_c(T'_n - T'_c) \quad (3.3)$$

$$Q_c = A_c U L M T D_c = \dot{m}(T'_n - T'_c) \quad (3.4)$$

Où LMTD est la différence de température moyenne logarithmique du condensateur :

$$L M T D_c = \frac{(T_{v,n} - T'_c) - (T_{v,n} - T'_n)}{\ln(T_{v,n} - T'_c) / (T_{v,n} - T'_n)} \quad (3.5)$$

Pour le condenseur hybride, la vapeur générée par le dernier effet mv, n traverse le condenseur à eau pour augmenter la température de l'eau de refroidissement de t_c à t_n , lequel est égal au débit massique de l'eau d'alimentation et le reste de la vapeur est condensée dans le condenseur à air. Un condenseur hybride se compose d'un condenseur à eau et d'un condenseur à air. La même les équations sont utilisées pour le condenseur hybride sauf pour quelques changements (Fig 4.2).

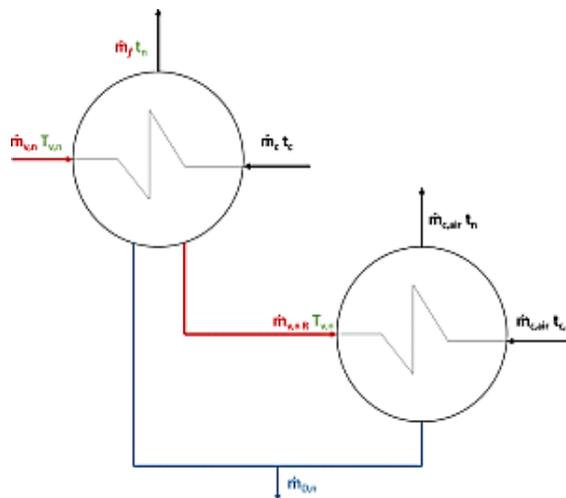


Figure 4.2 : schéma du condenseur hybride

Dans le condenseur à eau, le débit massique de l'eau de refroidissement est égal au débit massique de l'eau d'alimentation de l'unité, et la température de sortie du condenseur T_m est plus élevée que le condenseur normal, du fait que cette température est fixée en fonction de la température du condenseur à air, ainsi, la différence de température entre l'entrée et la sortie de la température de l'eau du condenseur à eau est plus grande. Dans le condenseur à air, la capacité thermique spécifique, C_p , et la température de refroidissement (température de l'air ambiant) sont modifiées.

IV.4: Résultats et discussion du MED modifié

Les performances et les caractéristiques de l'unité de configuration du condenseur à eau MED et du condenseur MED-Hybride sont analysées dans les mêmes conditions de fonctionnement. Le nombre d'effets a été fixé en fonction de la température la plus basse de la saumure d'entrée qui est de 65°C comme le montre la figure 3. L'étude paramétrique révélera la variation de nombreux paramètres en fonction de la température maximale de la saumure. Cela inclura les paramètres d'unité suivants :

- La surface spécifique de transfert de chaleur des effets, des préchauffeurs et du condenseur
- Le débit spécifique d'eau de refroidissement du condenseur
- Le débit spécifique de la vapeur source de chaleur
- Le taux d'eau de refroidissement
- Le GOR (Gain Output Ratio)
- Le taux de récupération PR

IV.5 Résultats et discussions :**IV.5.1 Résultats et discussion du MED modifié :**

Les performances et les caractéristiques de l'unité de configuration du condenseur à eau MED et du condenseur MED-Hybride sont analysées dans les mêmes conditions de fonctionnement. Le nombre d'effets a été fixé en fonction de la température la plus basse de la saumure d'entrée qui est de 65°C comme le montre la figure 3. L'étude paramétrique révélera la variation de nombreux paramètres en fonction de la température maximale de la saumure. Cela inclura les paramètres d'unité suivants :

- La surface spécifique de transfert de chaleur des effets, des préchauffeurs et du condenseur
- Le débit spécifique d'eau de refroidissement du condenseur
- Le débit spécifique de la vapeur source de chaleur
- Le taux d'eau de refroidissement
- Le GOR (Gain Output Ratio)

- Le taux de récupération PR

IV.5.1.1 Détermination du nombre d'effets

La figure 4.3 montre la limitation du nombre d'effets pour les deux configurations en fonction de la différence de température entre deux effets consécutifs qui est 2°C.

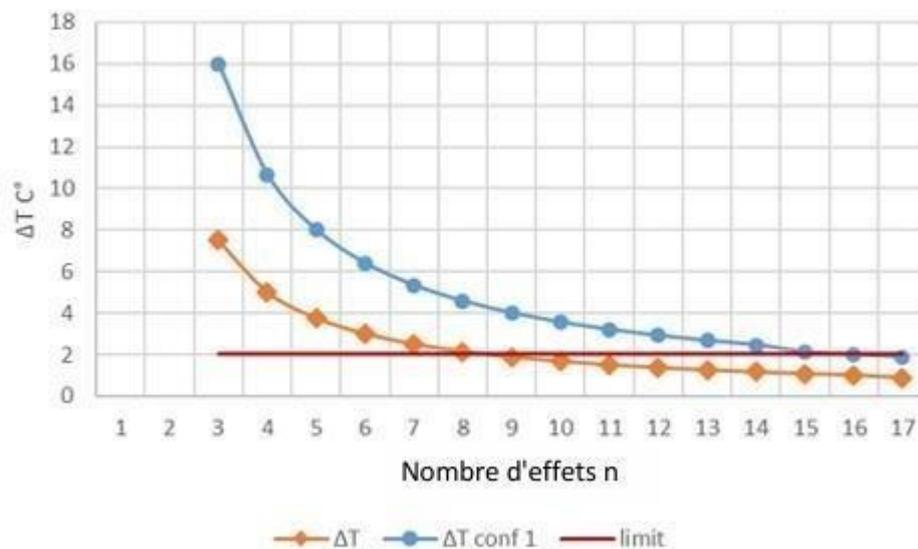


Figure 4.3: le nombre d'effet dans le système MED standard et le système MED a condenseur hybride

Comme il apparaît sur la Fig. 3.5, le condenseur MED-hybride est plus limité que le condenseur MED-eau en termes d'extension d'effet, où la configuration avec l'hybride le condensateur est limité à neuf effets au lieu de 17 effets pour la configuration du condenseur à eau. Ceci est dû à la différence de température entre la source de chaleur et le dernier effet limité vis-à-vis de la température du fluide de refroidissement et le type du dernier condenseur. Dans ce cas, la limitation du nombre d'effets est due à :

- La température du dernier effet, plus élevée pour le condenseur hybride (air + eau), que pour le condenseur standard(l'eau)
- La température de l'air ambiant supérieure à la température de l'eau de refroidissement
- Au type de condenseur car la différence de température entre l'entrée et la sortie du condenseur à air doit être d'au moins 20°C au lieu de 10°C dans un condenseur à eau Par conséquent, l'étude paramétrique sera appliquée pour neuf effets pour les deux configurations.

IV.5.1.2 Effet de la température maximale de la saumure sur l'unité MED

Dans cette partie, nous allons vérifier l'influence de la température maximale de la saumure sur les différents paramètres des unités MED pour le condenseur à eau standard et le condenseur hybride. La figure 3.6 représente la variation de la surface d'échange totale de la chaleur en fonction de la température maximale de la saumure. Nous remarquons que plus la température de la saumure augmente plus la taille de l'unité MED diminue pour les deux configurations. De plus, un résultat très important de cette variation est que la différence d'unité de taille entre les deux configurations diminue drastiquement avec l'augmentation de la température maximale de la saumure. Cela signifie que pour un condenseur de configuration hybride, la température de la saumure maximale doit être aussi élevée que possible pour réduire la différence de surface d'échange de chaleur et rendre cette configuration réalisable. On remarque qu'à partir de 75°C la surface totale de transfert de chaleur du système hybride MED est égale à la surface totale de transfert de chaleur du système MED standard presque à 65°C. En atteignant 100°C celui-ci est 50% plus petit que le MED standard à 65°C.

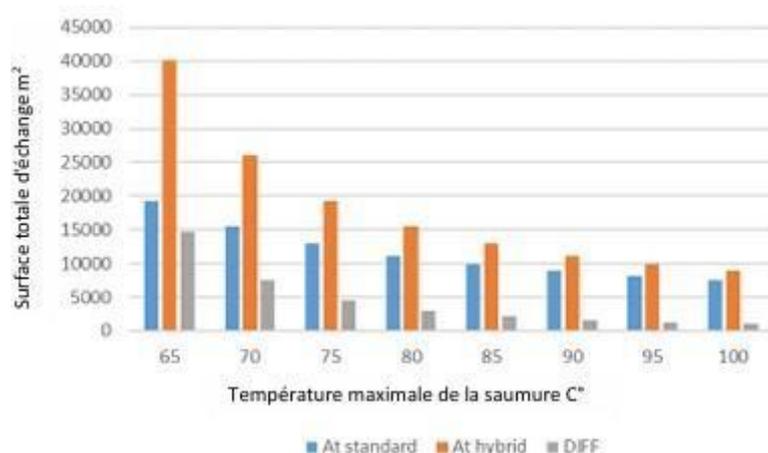


Figure 4.4 : variation de la surface totale des échangeurs de chaleur en fonction de la température d'entrée TBT pour les deux systèmes MED standard et hybride

La variation de la surface d'échange de la chaleur dans le dernier condenseur est présentée sur la Fig. 4.4 Comme on peut le voir la taille du dernier condenseur dans la configuration hybride est plus petite que la configuration standard, ce qui était inattendu, en ce qui

concerne la capacité calorifique de l'air. Mais le fait que dans la configuration hybride nous avons un condenseur à eau avec un écart de température Δt important, celui-ci condensera une plus grande partie de la vapeur et le reste de la vapeur sera condensé dans le condenseur à air ce qui explique ce résultat.

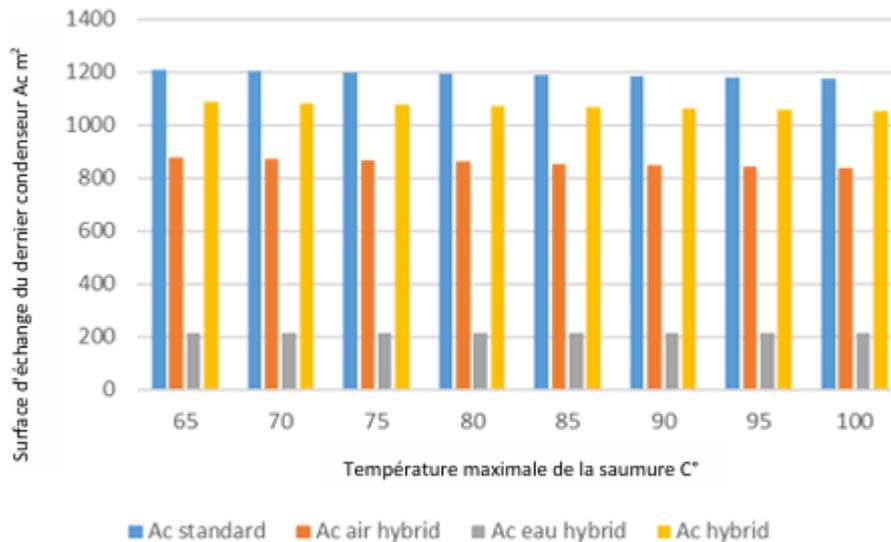


Figure 4.5: variation de la surface d'échange du dernier condenseur pour les deux systèmes MED Standard et MED modifié

La figure 4.5 montre le but de la transformation effectuée dans le dernier condensateur. Il présente la différence dans le débit massique de refroidissement d'eau pour les deux configurations. Comme on peut le voir dans le condenseur hybride, le débit massique d'eau de refroidissement représente l'eau d'alimentation de l'unité, contrairement à la configuration standard, où une partie importante de cette eau de refroidissement à une température plus élevée sera rejetée de l'unité vers l'aquifère. Ce graphique montre l'importance d'un condenseur hybride pour les zones arides non côtières.

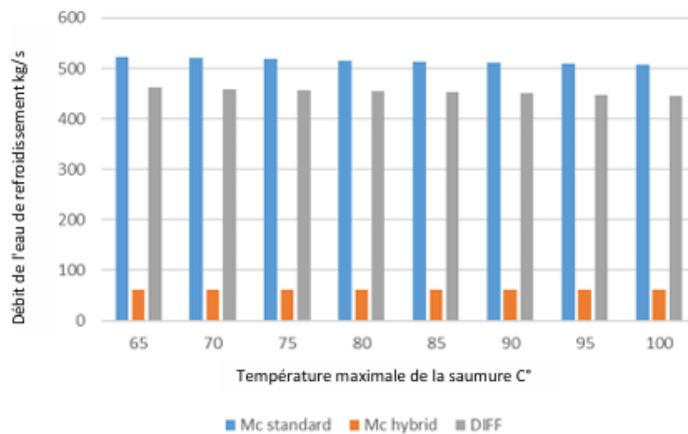


Figure 4.6 : variation du débit de l'eau de refroidissement pour les deux systèmes MED standard et MED hybride

On remarque que pour la même quantité d'eau propre produite, nous avons besoin de 10 fois moins de débit massique de refroidissement d'eau dans le dernier condenseur du système hybride, avec zéro rejet d'eau de ce dernier condenseur, par rapport au système MED standard. Les deux figures suivantes montreront l'impact de la haute température de la saumure et la configuration hybride d'un point de vue énergétique. Dans la Fig. 3.9, on remarque l'augmentation du débit massique de la source de chaleur avec la température maximale de la saumure, ce qui est logique, mais le débit massique de la source la chaleur pour le MED à condenseur hybride est inférieur à celui du MED à condenseur standard. Cependant, cette augmentation du débit massique de la source de chaleur reste faible (de 6,9 à 7,1 kg/s). La figure 3.10 concerne évidemment le rapport de gain de sortie de l'unité. Le GOR diminuera avec l'augmentation de la température maximale de la saumure en raison de l'augmentation du débit massique de la source de chaleur alors que le débit massique de l'eau d'alimentation reste constant, et le GOR est le rapport de ces deux derniers. Ici encore, la diminution du GOR reste faible (de 8,4 à 8,15).

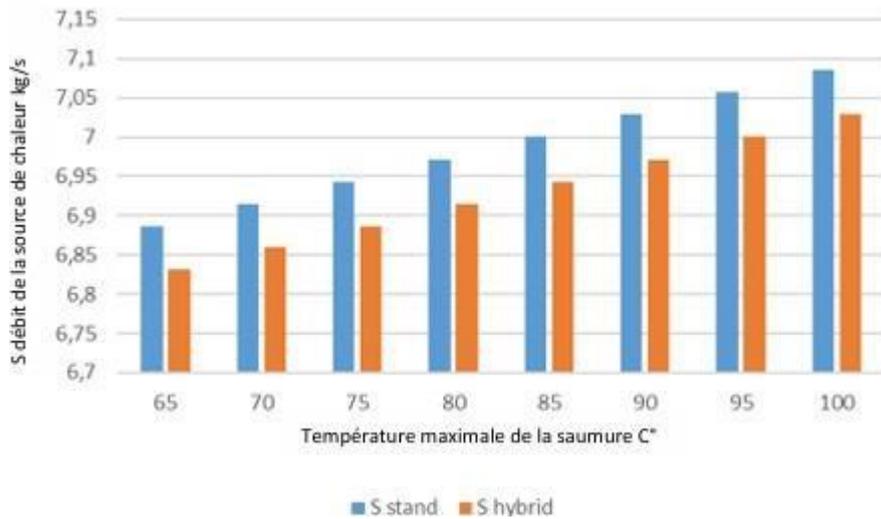


Figure 4.7 : variation du débit de la source de chaleur en fonction de la température d’entrée pour les deux systèmes MED standard et hybride

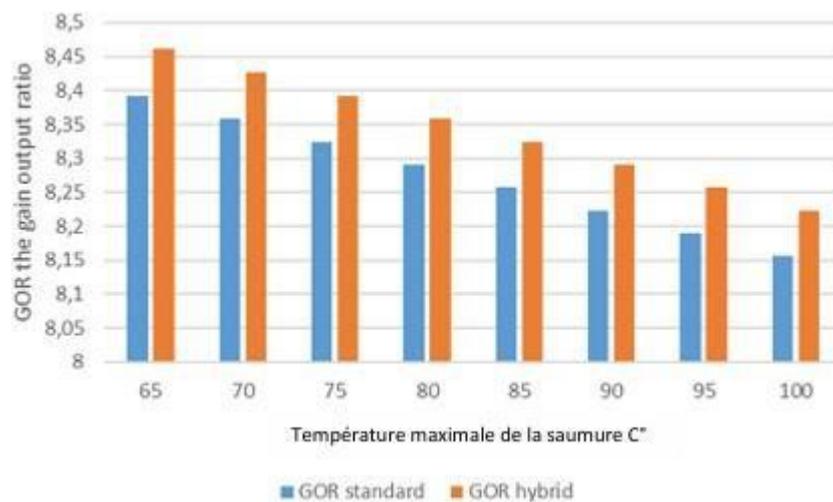


Figure 4.8 variation du GOR en fonction de la température d’entrée pour les deux systèmes MED standard et MED hybride

Pour montrer clairement l'impact du système MED sur l'eau de la nappe, suivant le type de condenseur final, la Fig. 3.11 présente le rapport de l'eau de refroidissement à l'eau produite par l'unité. Ce rapport pour le condenseur MED hybride est constant et égal à 1,043, l'empreinte environnementale de l'eau pour cette configuration est la plus faible. Cependant, pour le condenseur MED-eau, ce rapport pourrait atteindre plus que 18 fois pour une unité de dessalement à trois effets, ce qui signifie que le débit massique d'eau de refroidissement est 18 fois plus élevé que l'eau produite. Plus il y a d'effets dans l'unité de

dessalement, plus le ratio est bas. Mais même à un nombre élevé d'effets, le rapport est encore important, car il atteint 4 pour 14 effets. Cela signifie qu'au moins quatre fois plus d'eau doit être pompée à chaque endroit pour satisfaire les consommations d'eau réelle, et cela aura un impact environnemental énergétique et économique important. L'eau rejetée du dernier condenseur du dernier effet dans le système MED standard dans l'aquifère à une température plus élevée aura un impact négatif important sur cette dernière.

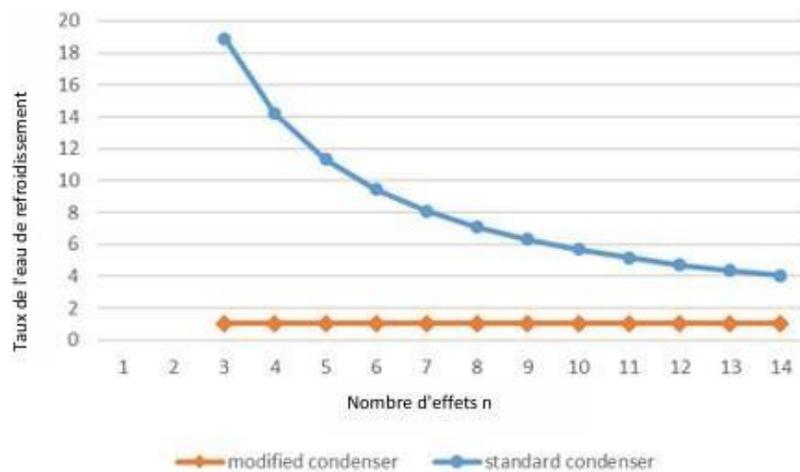


Figure 4.9: variation du taux d'eau de refroidissement avec le nombre d'effet pour les deux systèmes MED standard et MED hybride

La Figure 4.9 montre la variation du taux de récupération avec le niveau de salinité de l'eau d'alimentation. Le taux de récupération de l'unité de dessalement est un paramètre très important. Il donne la quantité de saumure rejetée de l'eau d'alimentation utilisée. La saumure rejetée des unités de dessalement a un grand impact environnemental, et son traitement nécessite des charges financières supplémentaires et conduit à un coût de l'eau plus élevé. Pour réduire l'impact de la saumure rejetée, le taux de récupération doit être le plus élevé possible. Le taux de récupération de l'unité de dessalement dépend uniquement du bilan de salinité de l'unité, c'est-à-dire de la salinité de l'eau d'alimentation, qui est définie à partir des caractéristiques de l'eau, et de la salinité de la saumure rejetée, qui est fixée à partie du graphique de solubilité thermodynamique et dépend de la température. Il est clair que le taux de récupération diminue avec l'augmentation de la salinité de l'eau, où

plus de 95% est atteint à 3 g/L de salinité de l'eau d'alimentation, avec un rejet de la saumure à une salinité de 70 g/L.

Le taux de récupération de l'unité MED est de 80% avec une salinité de l'eau d'alimentation de 14 g/L, ce qui permet de traiter les eaux de drainage agricole souterraines qui ont un niveau de salinité variable au cours de l'année. Le traitement de cette eau est très important pour réduire l'impact de pompage de l'eau sur l'aquifère en réduisant la consommation d'eau agricole qui est d'environ 70% de l'eau totale de consommation de la région.

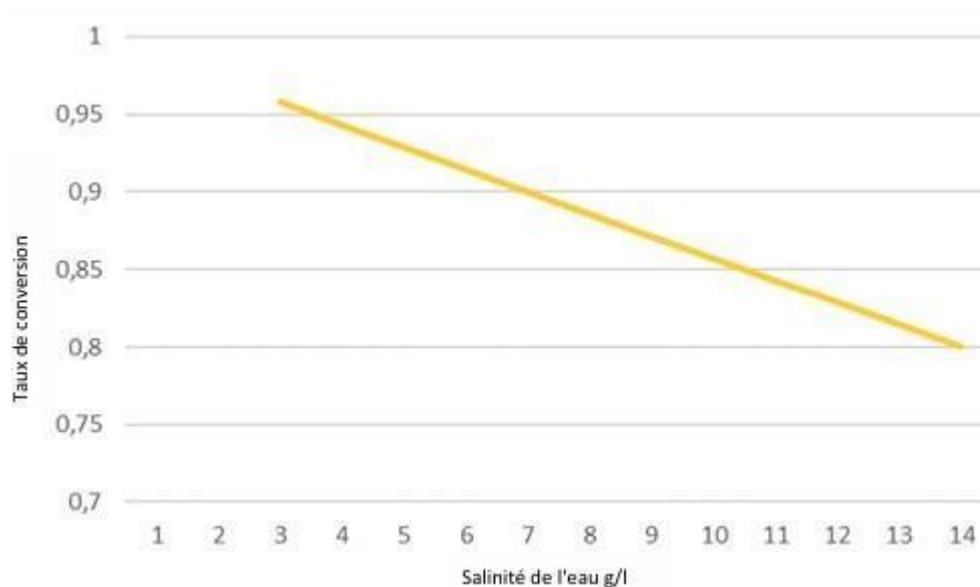


Figure 4.10 : taux de conversion du système MED en fonction de la salinité de l'eau

IV.6: CONCLUSION :

Dans ce chapitre, les résultats de l'étude des différents paramètres du système de dessalement MED modifié proposé afin de minimiser l'impact de ce système sur la nappe d'eau. Le procédé MED a été choisi pour sa flexibilité vis à vis du changement de salinité, son taux de conversion élevé pour une eau saumâtre (96% à 3g/l de salinité, 80% à 14g/l), la simplicité de sa maintenance. Cependant pour minimiser l'impact sur l'aquifère, le rejet de l'eau de refroidissement du dernier condenseur doit être éliminé.

IV.7 Résultats et discussions :

IV.7.1 Résultats et discussion du MED GEOTHERMIQUE :

• **Équations du Condenseur Géothermique:**

Afin d'optimiser nos résultats du dernier condenseur, on a utilisé un condenseur géothermique enfoui sous terre, la vapeur générée par le dernier effet, est introduite dans le condenseur géothermique, vue la stabilité de la température souterraine qui est de 26 c° à une profondeur de 5 mètre La température de la vapeur d'eau générée au dernier effet est estimé 35 degré C. cela aura un impact positif du points de vue énergétique comparer au système de condenseur hybride (eau + air) ou la température de la vapeur du dernier effet est estimé à 55 c° à cause de la température annuelle moyenne de la région.

• **Première équation :**

$$Q = mv * Lv \quad (4.0)$$

$$Q_{sol} = m * Cp * (tn - tsol) \quad (4.1)$$

$$m * Cp * (tn - tsol) = mv * Lv \quad (4.2)$$

$$m = \frac{mv * Lv}{Cp * (tn - tsol)} \quad (4.3)$$

$$m = \frac{(DF * 2400)}{(tn - tsol) * 900} \quad (4.4)$$

Avec :

DF : est le débit de la vapeur générer (mv en kg/s).

m : est la masse de vapeur générer au dernier effet. (kg)

Lv : chaleur latente de vaporisation prise 2400j/k

Tn et Tsol (k°) : sont la température de la vapeur générer et celle du sol en ordre

Cp : la capacité thermique qui varie entre {800-2000} prise : 900 j.kg-1.k-1

• **Deuxième équation :**

$$m = V * \rho \quad (4.5)$$

$$V = [2 * \pi * r_3^2 * L] - [2 * \pi * r_2^2 * L] \quad (4.6)$$

$$V = L * [2\pi r_3^2 - 2\pi r_2^2] \quad (4.7)$$

$$m = L * [2\pi r_3^2 - 2\pi r_2^2] * \rho \quad (4.8)$$

CHAPITRE IV Modélisation mathématique de l'unité MED

m et V : sont la masse (kg) et le volume(m^3) en ordre.

ρ : La masse volumique égale a : $1500 \text{ kg}/m^3$.

r1 et r2 : sont les deux rayons intérieur et extérieur en ordre du tube sous terrain (mètre).

L : la longueur du tube utilisé dans notre système (mètre).

$$L = \frac{\left(\frac{m}{1500}\right)}{[2\pi R_3^2 - 2\pi R_2^2]} \quad (4.9)$$

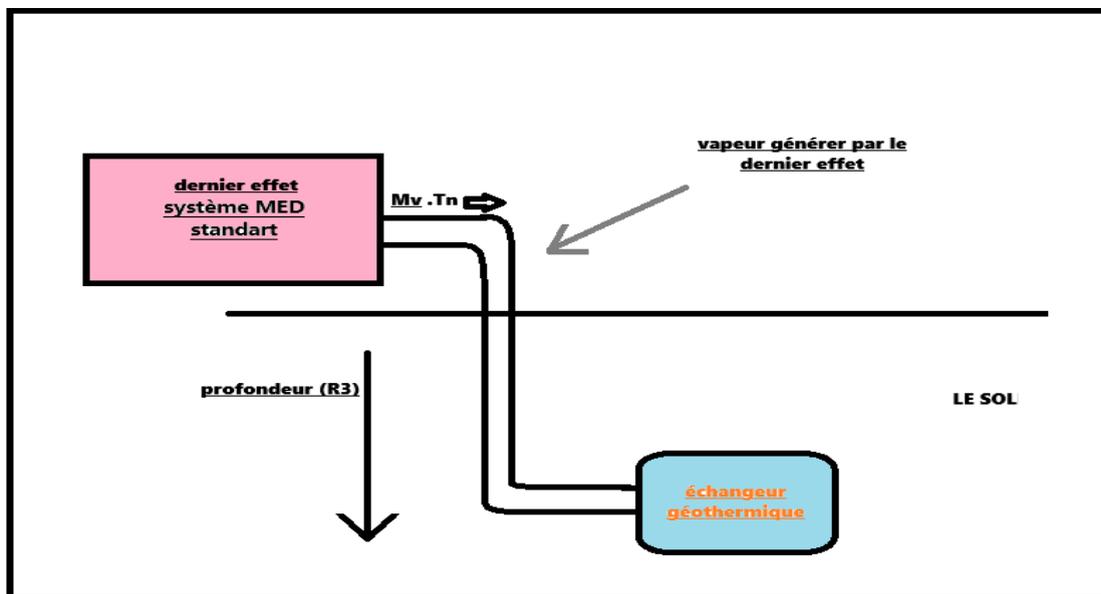


FIGURE 4.11: Schéma du système géothermique

La vapeur d'eau passera à travers une tuyère passent sous le sol afin d'accomplir un échange de chaleur avec la température basse de la terre a fin de compléter la condensation de la vapeur avec un maximum de gain d'eau pure.

IV.7.2 : Résultats et discussion du :

Les performances et les caractéristiques de l'unité de configuration du condenseur géothermique est analysée dans les mêmes conditions de fonctionnement avec une température de sortie au dernier effet égale à 35degree C.

L'étude paramétrique révélera la variation de nombreux paramètres d'unité suivants :

- La variation de Hin en fonctionne du rayon de l'échangeur pour différentes quantité de vapeur.
- La variation de longueur d'échangeur en fonction de la profondeur pour des rayons de tube.
- La variation de la surface d'échangeur en fonction de la profondeur pour des différentes quantités de vapeur.

Définition de Hin : est un coefficient de transfert thermique. Il permet de quantifier un transfert de chaleur réalisé par un phénomène de convection au sein d'un fluide en mouvement.

IV.7.2.1 Détermination de la variation de H_{in} :

La figure 4.3 montre la variation de H_{in} en fonction du rayon du tube avec une variation du débit DF de 5kg/s jusqu'à 205kg/s.

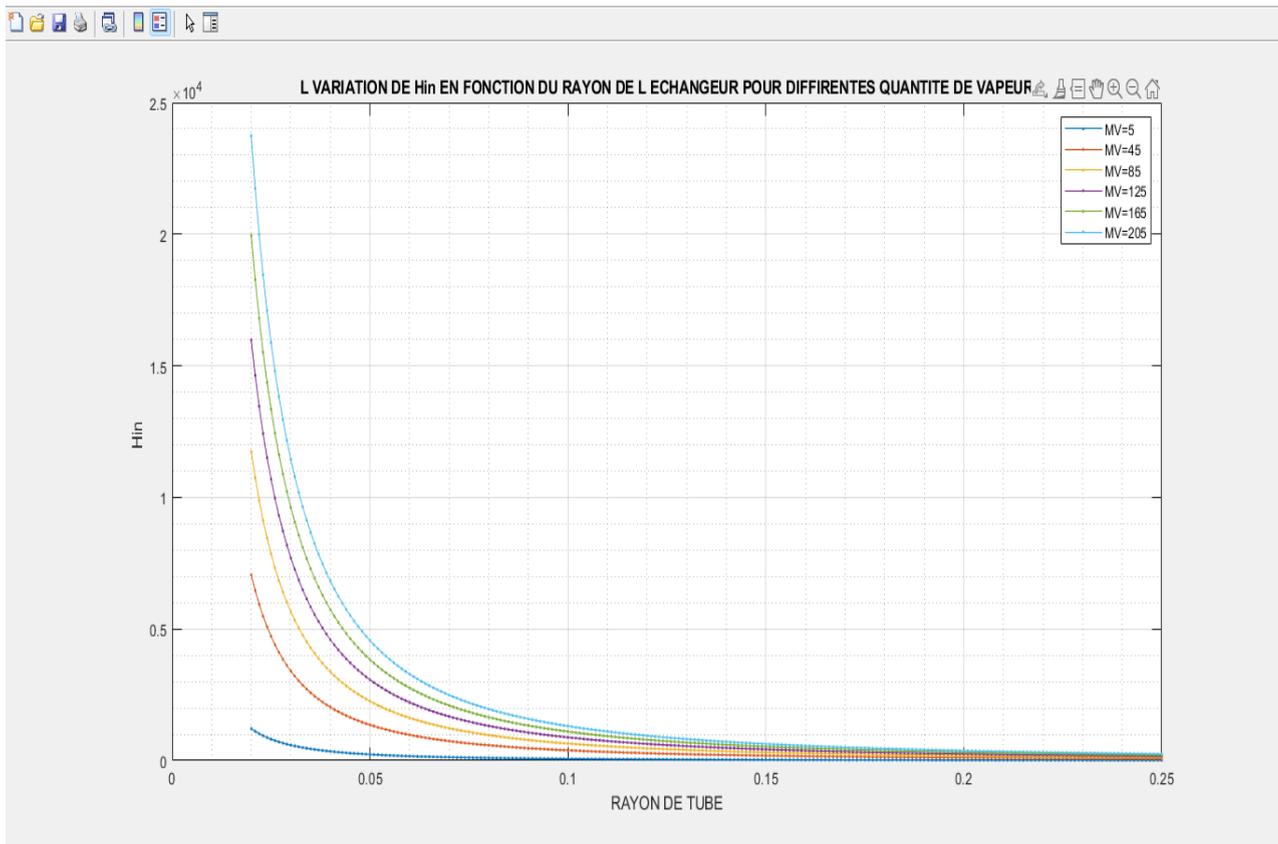


FIGURE 4.12 : La variation de H_{in} en fonction du rayon de l'échangeur pour différentes quantités de vapeur.

Ce graphique présente la variation de H_{in} en fonction du rayon de tube (en mètres) pour différentes quantités de vapeur (mv). Plusieurs courbes sont représentées, chacune correspondant à une valeur de quantité de vapeur spécifique.

H_{in} diminue de façon exponentielle lorsque le rayon de tube augmente et à mesure que la quantité de vapeur augmente (par exemple $MV = 205 \text{ kg/s}$), les valeurs initiales de H_{in} sont plus élevées. Les courbes se rapprochent toutefois les unes des autres lorsque le rayon augmente.

Pour des rayons supérieurs à environ 0,15 m, H_{in} tend à se stabiliser à des valeurs proches de zéro, quel que soit le MV.

IV.7.2.2 Conclusion :

Le graphique illustre que H_{in} décroît rapidement avec l'augmentation du rayon du tube. Toutefois, cette diminution est plus marquée pour de faibles rayons. La quantité de vapeur a une influence importante sur les valeurs initiales de H_{in} , avec des valeurs plus élevées pour des quantités de vapeur plus importantes. À des rayons élevés, l'impact de la quantité de vapeur devient négligeable, car toutes les courbes convergent vers des valeurs faibles et stables.

Pour optimiser l'échange thermique, il est préférable de diminuer le rayon des tubes, ce qui permet d'élever notre H_{in} , particulièrement lorsque des quantités de vapeur élevées sont impliquées.

IV.7.2.3 Détermination de la variation de longueur d'échangeur :

La figure 4.13 montre la variation de longueur d'échangeur en fonction de la profondeur pour des rayons de tube avec une quantité de vapeur de valeur 205kg/s.

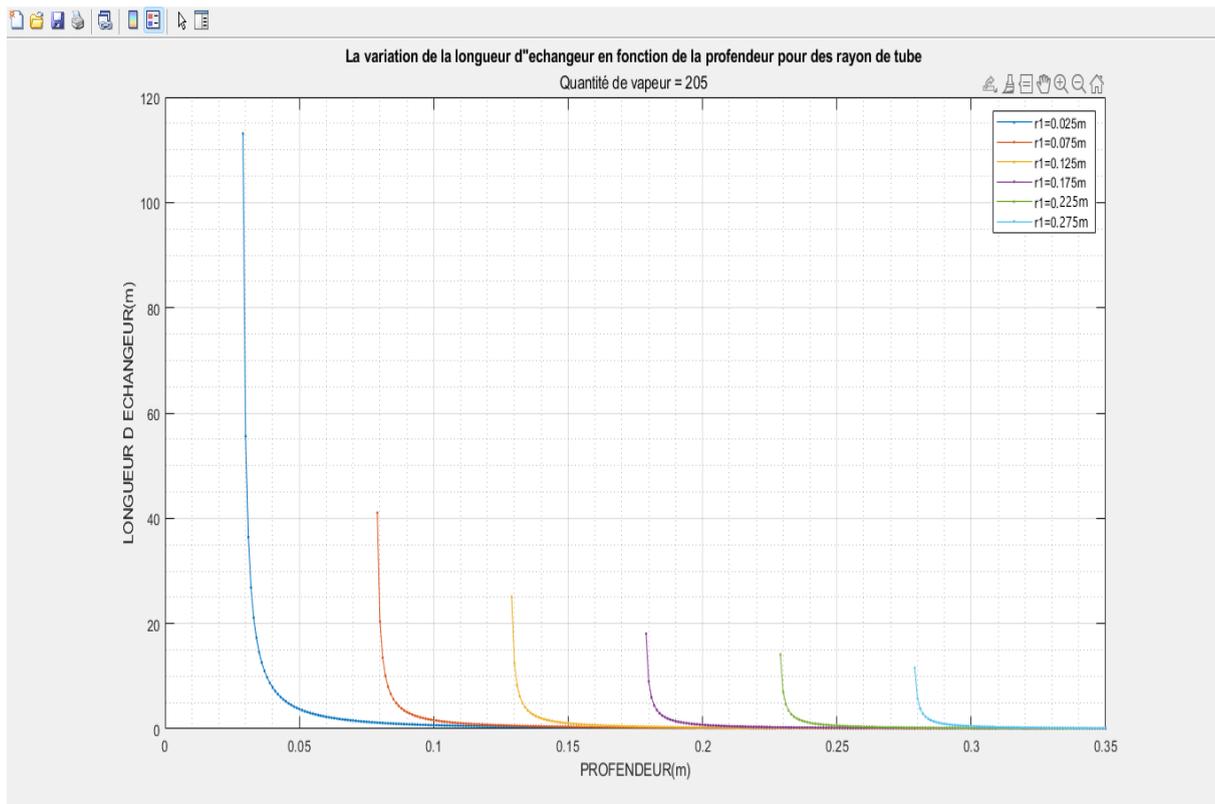


FIGURE 4.13 : La variation de longueur d'échangeur en fonction de la profondeur pour des rayons de tube. En remarque dans cette figure 4.13 un graph avec plusieurs courbes décroissantes chacune correspondant à une valeur de rayon spécifique, la longueur de l'échangeur diminue de façon non linéaire à mesure que la profondeur augmente.

Pour des rayons plus grands (par exemple $r=0.275m$), la courbe est plus basse, indiquant que la longueur de l'échangeur nécessaire diminue plus rapidement.

Pour des rayons plus petits ($r=0.025m$), la longueur requise est plus grande et décroît plus lentement.

IV.7.2.4 Conclusion :

Le graphique montre que la longueur de l'échangeur nécessaire diminue avec l'augmentation de la profondeur, mais cet effet est plus marqué pour des rayons de tube plus grands. Ainsi, des tubes avec des rayons plus importants nécessitent des échangeurs plus courts pour atteindre une certaine efficacité d'échange thermique.

Cela souligne l'importance d'optimiser la profondeur et le rayon des tubes pour réduire la taille des échangeurs thermiques.

IV.7.2.5 Détermination de la variation de la surface d'échangeur :

La figure 4.14 montre la variation de la surface d'échangeur en fonction de la profondeur pour des différentes quantités de vapeur.

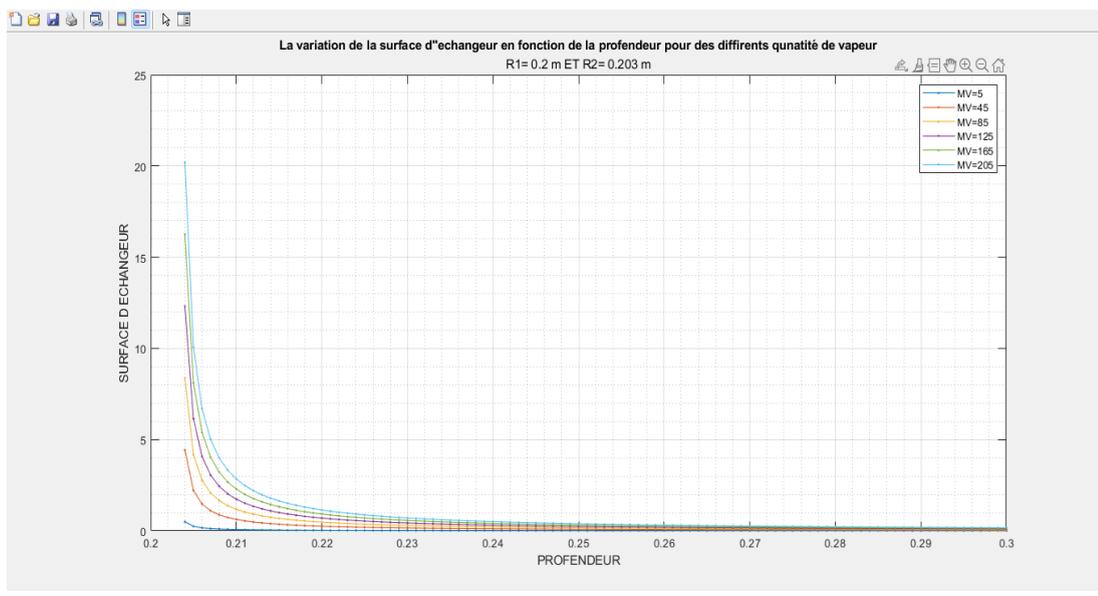


Figure 4.14 : La variation de la surface d'échangeur en fonction de la profondeur pour des différentes quantités de vapeur.

Dans cette figure 4.14, Ce graphique montre la variation de la surface d'échangeur (en m²) en fonction de la profondeur (en mètres) pour différentes quantités de vapeur.

En remarque que la surface d'échangeur diminue fortement avec l'augmentation de la profondeur. Cette diminution est plus marquée pour des faibles profondeurs.

Pour des quantités de vapeur plus élevées ($MV = 205\text{kg/s}$), la surface initiale de l'échangeur est plus grande et à mesure que la profondeur augmente, les courbes des différentes quantités de vapeur convergent progressivement vers des valeurs faibles et à des profondeurs supérieures à environ 0.23 m, la surface d'échangeur devient quasiment constante.

IV.7.2.6 Conclusion :

Le graphique montre que la surface d'échangeur nécessaire diminue rapidement avec l'augmentation de la profondeur. Les quantités de vapeur élevées nécessitent initialement une surface plus grande, mais cet écart diminue avec la profondeur. Pour optimiser la surface d'échangeur, il est avantageux d'augmenter la profondeur. Cela permet de réduire la surface nécessaire, ce qui est particulièrement bénéfique pour des quantités de vapeur plus importantes.

IV.7.3 CONCLUSION FINAL :

D'après les résultats précédents, nous procédant à faire une comparaison entre nos deux système hybride et géothermique.

Depuis les dernières recherches, le condenseur hybride requis un prélèvement de température très élevé mais nécessaire pour les procédures, l'eau d'alimentation doit atteindre une température de 100Degree C° afin de réaliser des résultats qui nous conduit à un énorme gaspillage d'énergie, dans l'intention d'accomplir ce processus le système hybride exige des échangeurs particulier avec des grandes surfaces d'échange cela conduit à des problèmes de construction et de préservation.

Par contre dans le système géothermique, la température initiale de 65degree C° du MED standard réponds à nos besoins, cela préservera notre énergie pour effectuer plusieurs procédés de distillation, l'installation d'un tel système reste raisonnable avec des tubes de rayon et profondeur légèrement normal qui simplicité son installation et préservation.

Cependant le rejet d'eau salé n'est jamais nul et pour minimiser l'impact sur l'aquifère, le rejet de l'eau restant dans ce dernier doit être éliminé

Références

- [1] A. Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, 2^{eme} édition TEC&DOC ,286p, 2006.
- [2] A.Brahimi et H.Hamdi, Contrôle de qualité et évaluation du processus de dessalement de l'eau de mer par la technique d'osmose inverse (station de dessalement de Bou Ismail W. Tipaza). Mémoire d'ingénieur, Université de SAAD DAHLEB DE BLIDA. Algérie, 2009/2010.
- [3] L. Roch; au croisement entre pénurie d'eau et société du risque: un nouvel éclairage sur la problématique de l'eau, université de Québec Montréal, déc. 2008.
- [4] I. A. Shiklomanov, world fresh water resources, 1993.
- [5] Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et Fond des Nations Unies pour l'Enfance (UNICEF), Water for life: making it happen. Genève, 2004
- [6] R. Petrella ; Le manifeste de l'eau: pour un contrat mondial. Bruxelles 1998.
- [7] M. Falkenmark, G. Lindh; Water for a starving world. Boulder westview Press.1976.
- [8] Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD). Rapport mondial sur le développement humain. Au-delà de la pénurie: pouvoir, pauvreté et crise mondiale de l'eau, New York, 2006.
- [9] D. Renault, W. W. Wallender; Nutritionnal water productivity and diet. Agricultural water management, vol. 45 n°3, 2000.
- [10] P. H. Gleick, Water in crisis: a guide to the worlds fresh water resources. New York Oxford University Press. 1993.
- [11] R. Hassan, R.Scholes, N. Ash ; Ecosystems and human well-being: current state and trends 2005.
- [12] N. Poff et al; The natural flow origin: a paradigm for river conservation and restoration. In Bioscience vol 47 n°11. 1997.
- [13] S. E. Bunn, A. H. Arthington; Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. In environmental management vol 30 n°4. 2002.
- [14] UNESCO, 3^{ème} rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau: L'eau dans un monde qui change. 2009.
- [15] UNESCO, Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau: l'eau dans un monde durable. 2015
- [16] J. Morel. Les ressources en eau sur Terre : origine, utilisation et perspectives dans le contexte du changement climatique – un tour d'horizon de la littérature. 2007.
- [17] A. Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. 2^{ème} édition. Paris : TEC & DOC. 2006.

- [18] I. A. Shiklomanov, J. C. Rodda (2003). *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [19] I. A. Shiklomanov. Summary of the monograph « World Water Resources at the beginning of the 21st century » prepared in the framework of the IHP UNESCO. Saint Petersburg: State Hydrological Institute (SHI). 1999.
- [20] T. Gleeson, Y. Wada, M. F. P. Bierkens, and L. P. H. van Beek, "Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint," *Nature*, vol. 488, no. 7410, pp. 197–200, 2012, doi: 10.1038/nature11295.
- [21] N. Boubou, *Eau, environnement et énergies renouvelables : vers une gestion intégrée de l'eau en Algérie*, thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen. 2015.
- [22] G. Marsily, Académie des Sciences. *Les eaux continentales. Rapport sur la Science et la Technologie n° 25*. Paris. 2006.
- [23] A.F.Boschet, *Ressources en eau et sante en Europe- Journal Européen d'Hydrologie*, 2002.
- [24] C.M. Haidar. *Évaluation de la qualité de l'eau du bassin supérieur de la rivière du Litani, Liban : approche hydrogéochimique*. Sciences de la Terre. Thèse de doctorat. Université de Lorraine, 2014.
- [25] IPCC (2001a). *Climate Change 2001: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [26] M. Meybeck, R. Helmer; *The quality of rivers from pristine stage to global pollution. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeogeology, (Global and Planetary Change Section)*, vol.75. 1989.
- [27] W. Alhalabi, J. H. Reif, *Solar-thermal powered desalination: Its significant challenges and potential*. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol48*, 2015.
- [28] A. Kettab, *Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision*. *Desalination May 2001*
- [29] B. Remini, *La Problématique de l'eau en Algérie*, in *Collection hydraulique et transport*. 2005.
- [30] *Ministère des Ressources en eau*. 2011.
- [31] C. Comella, H. Guerrée, *La distribution d'eau dans les agglomérations urbaines et rurales*, Éditions Eyrolles, Paris, 1974.
- [32] T. Bouzid, *Les barrages et la politique hydraulique en Algérie : état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable*. Thèse de Doctorat. University Mentouri Constantine. 2010
- [33] S. Djaffar, A. Kettab, *La gestion de l'eau en Algérie : quelles politiques, quelles stratégies, quels avenir ?* In *Algerian Journal of Environmental Science and Technology April edition. Vol.4. No1. (2018)*

- [34] B. Messaouda, Aperçu Hydrogéologique et Hydrochimique Sur le Système de Captage Traditionnel des Eaux Souterraines "Foggara" Dans la Région D'adjar, Magister, Badji Mokhtar University, Annaba, Algeria, 2013.
- [35] Système Aquifère du Sahara Septentrional Une Conscience de Bassin, Vol. 2, Hydrogeologie, 2003.
- [36] Système Aquifère du Sahara Septentrional, gestion concertée d'un bassin transfrontalier, OSS Tunis 2008.
- [37] A. Hamlat, Contribution à la gestion des ressources en eau des bassins versants de l'ouest Algérien à l'aide d'un système informatisé. Thèse de Doctorat Université M. Boudiaf Oran 2014.
- [38] O. Lafont, J. Ibn Hayyân, the « father of written chemistry: myth or reality? Journal of Materials and Environmental Science. 1 (4) 205-212, 2010
- [39] H. Zheng, Solar Energy Desalination Technology, Elsevier 2017.
- [40] V. Belessiotis, E. Delyannis. The history of renewable energies for water desalination. Desalination 2000;128:147e59.
- [41] M. Mas, G.N. Tiwari, A. Kumar, A.S. Sodha, Solar distillation. Oxford: Pergamon Press; 1982. p. 8e17. [37] S. Mansour, H. A. A
- [42] S. Mansour, H. A. Arafat, and S. W. Hasan, "Chapter 5 - Brine Management in Desalination Plants," H. A. B. T.-D. S. Arafat, Ed. Elsevier, 2017, pp. 207–236.
- [43] P.H. Gleick, 2006. The World's Water 2006–2007, The Biennial Report on Freshwater Resources. Island Press, Chicago.
- [44] G. Wolff, 2006. The Economics of Desalination. Pacific Institute. Available from: <http://texas.sierraclub.org/water/conference/SAWConfPPTs/GaryWolff.pdf> (accessed 13.02.08.).
- [45] J.E. Miller, 2003. Review of Water Resources and Desalination Technologies. Available from: Sandia National Laboratories <http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/2003/030800.pdf> (accessed 25.05.08.).
- [46] F.G. Lauren, F.L. Desmond, D.F. Benny, M. Benoit, M. Philippe, Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. Water research 43 (2009) 2317–2348.
- [47] E. Jones, M. Qadir, M. T. H. van Vliet, V. Smakhtin, and S. Kang, "The state of desalination and brine production: A global outlook," Sci. Total Environ., vol. 657, pp. 1343–1356, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>.
- [48] E. Jones, M. Qadir, M. T. H. van Vliet, V. Smakhtin, and S. Kang, "The state of desalination and brine production: A global outlook," Sci. Total Environ., vol. 657, pp. 1343–1356, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>.
- [49] MOUDJEBER Djamel-Eddine, Utilisation des énergies renouvelables dans le dessalement : Cas de l'Algérie. Thèse doctorat 2015, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

- [50] H. Mahmoudi, O. Abdellah, and N. Ghaffour, "Capacity building strategies and policy for desalination using renewable energies in Algeria," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 4, pp. 921–926, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.02.001>.
- [51] S.Kehal. Rétrospective et perspective du dessalement en Algérie. *Desalination*, vol 136, 2001.
- [52] L.Habet. Contribution à l'étude des impacts du dessalement des eaux de mer sur l'environnement : cas du littoral de Boumerdes. Mémoire de magister. 2010.
- [53] V. G. Gude, "Desalination and sustainability – An appraisal and current perspective," *Water Res.*, vol. 89, pp. 87–106, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.012>.
- [54] A.M.H. El-Saie, Y.M.H. Ali El-Saie, A. Deghedi Moneer, Perspectives and challenges for desalination in the 21st century, *Desalination* 135 (2001) 25–42.
- [55] A. Bennett, 50th anniversary: desalination: 50 years of progress, *Filtr. Sep.* 50 (3) (2013) 32–39, [http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882\(13\)70128-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882(13)70128-9).
- [56] S. Corrado, Approaches to desalination project budgeting, Paper Presented at the International Conference on Desalination Costing, Limassol, Cyprus, 2004. 137
- [57] D.A. Roberts, E.L. Johnston, N.A. Knott, Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: a critical review of published studies, *Water Res.* 44 (18) (2010) 5117–5128, <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.036>.
- [58] DesalData, 2016, Retrieved from: <http://desaldata.com/>.
- [59] A. Subramani, J.G. Jacangelo, Emerging desalination technologies for water treatment: a critical review, *Water Res.* 75 (2015) 164–187, <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.032>.
- [60] A. Bennett, "Cost effective desalination: Innovation continues to lower desalination costs," *Filtr. + Sep.*, vol. 48, no. 4, pp. 24–27, 2011, doi: [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(11\)70164-1](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(11)70164-1).
- [61] C. Sommariva, *Desalination and Advanced Water Treatment: Economics and Financing*. Balaban Desalination Publications, 2010.
- [62] V. Belessiotis, S. Kalogirou, and E. Delyannis, "Chapter One - Desalination Methods and Technologies—Water and Energy," V. Belessiotis, S. Kalogirou, and E. B. T.-T. S. D. Delyannis, Eds. Academic Press, 2016, pp. 1–19.
- [63] IDA Desalination Yearbook, 2010/2011. *Water desalination Report*. Media Analytic Ltd., Oxford, UK (2010,2011).
- [64] K.S Spiegler, A.D.K. Laird, « Principles of Desalination », 2nd edition, Academic Press, New York, 1980.
- [65] J. P. Méricq, « Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

- [66] M. Al-Shammiri and M. Safar, "Multi-effect distillation plants: state of the art," *Desalination*, vol. 126, no. 1, pp. 45–59, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00154-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00154-X).
- [67] « dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens : évaluation des impacts sur l'environnement et lignes directrices proposées pour la gestion de la saumure », Réunion des Points Focaux du PAM Athènes, Programme des Nations Unies pour l'environnement, 11-14 septembre 2001.
- [68] A. D. Khawaji, I. K. Kutubkhanah, and J.-M. Wie, "Advances in seawater desalination technologies," *Desalination*, vol. 221, no. 1, pp. 47–69, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.067>.
- [69] M.E. Findley, « Vaporization through porous membranes », *Industrial Engineering Chemical Vol.6*, 1967, pp.226-230. 138
- [70] C. Tansakul, « Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse », Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 2009.
- [71] H. Boulehdid, « Elaboration et caractérisation d'une membrane cationique monosélective par modification chimique d'un film ETFE », Thèse de doctorat, université libre de Bruxelles, 2008.
- [72] D. J. Mehta, A. V Rao, and K. P. Govindan, "Water Desalination a perspective for membrane processes in India," *Desalination*, vol. 30, no. 1, pp. 325–335, 1979, doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)88461-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)88461-1).
- [73] H. Balmann, « Electrodialyse », *Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie des Procédés*, n°J2840, 2006.
- [74] P. Danis, « Dessalement de l'eau de mer », *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés*.
- [75] World Bank. 2012. *Renewable Energy Desalination: An Emerging Solution to Close the Water Gap in the Middle East and North Africa*. Washington, DC: World Bank. DOI:10.1596/978-0-8213-8838-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0.
- [76] Al Jahani, A. A. 2008. *Dugong's Waning Populace in Arabian Gulf: A Chronicle*. Abu Dhabi, UAE: MoEW (Ministry of Environment and Water). http://uaeagrcent.moew.gov.ae/fisheries/Dugong_e.stm.
- [77] T. Höpner and J. Windelberg, "Elements of environmental impact studies on coastal desalination plants," *Desalination*, vol. 108, no. 1, pp. 11–18, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(97\)00003-9](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00003-9).
- [78] A. Al-Karaghoul and L. L. Kazmerski, "Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 343–356, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.064>.
- [79] U. Lachish, *Osmosis and thermodynamics*. *American Journal of Physics* 2007;75(11)
- [80] P. Palenzuela, D.-C. Alarcón-Padilla, and G. Zaragoza, "State of the Art of Desalination Processes BT - Concentrating Solar Power and Desalination Plants: Engineering and Economics of Coupling

Multi-Effect Distillation and Solar Plants,” P. Palenzuela, D.-C. Alarcón-Padilla, and G. Zaragoza, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 1–25.

[81] A. Hadji, N. K. Merzouk, M. Merzouk, S. Alexopoulos, and Z. Tigrine, “Study of a modified multiple effect distillation (Med) brackish water system for a minimal water footprint,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 213, pp. 44–52, 2021, doi: 10.5004/dwt.2021.26715.

[82] M. T. Chaibi and A. M. El-Nashar, “Solar Thermal Processes BT - Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes,” G. Micale, L. Rizzuti, and A. Cipollina, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 131–163.

[83] M. Al-Shammiri and M. Safar, “Multi-effect distillation plants: state of the art,” *Desalination*, vol. 126, no. 1, pp. 45–59, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S00119164\(99\)00154-X](https://doi.org/10.1016/S00119164(99)00154-X).

[84] M. A. Darwish, F. Al-Juwayhel, and H. K. Abdulraheim, “Multi-effect boiling systems from an energy viewpoint,” *Desalination*, vol. 194, no. 1, pp. 22–39, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.08.029>.

[85] H. T. El-Dessouky, H. M. Ettouney, and F. Mandani, “Performance of parallel feed multiple effect evaporation system for seawater desalination,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 20, no. 17, pp. 1679–1706, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(99\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00098-8).

[86] A. Diaf, A. Cherfa, L. Karadaniz, and Z. Tigrine, “A technical–economical study of solar desalination,” *Desalination*, vol. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.09.017>.